



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PERTTU VIHTIÄLÄ
KOTITALOUDEN OMAN SÄHKÖNTUOTANNON VAIKUTUS ÄLYK-
KÄÄSEEN SÄHKÖVERKKOON

Kandidaatintyö

Tarkastaja: lehtori Kirsi Nousiainen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
2. helmikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Vihtiälä, Perttu: Kotitalouden oman sähköntuotannon vaikutus älykkääseen sähköverkkoon

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 40 sivua

Huhtikuu 2018

Tekniikan kandidatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähkövoimatekniikka

Tarkastaja: lehtori Kirsi Nousiainen

Avainsanat: älykäs sähköverkko, hajautettu sähköntuotanto, pientuotanto, mikro-tuotanto, tuulivoima, aurinkosähkö

Ilmastonmuutoksen hidastaminen sekä Suomen lainsäädännön myötä kiristynyt sähkön toimitusvarmuus velvoittavat nykyisen sähköenergiajärjestelmän kehittämistä. Sähköntuotannossa aiheutuvia päästöjä pyritään vähentämään korvaamalla uusiutumattomia tuotantomuotoja uusiutuvilla, kuten aurinkosähköllä ja tuulivoimalla. Teknologian kehittyminen ja uuden tuotannon liittäminen aiheuttavat uudenlaisia toimenpiteitä sähköverkon suunnitteluun. Uudelle tuotannolle on myös tiettyjä vaatimuksia ennen kuin se voidaan turvallisesti liittää verkkoon. Tuottajan pitää valita itselleen sopivin järjestelmä. Verkkoyhtiöille uusi tuotanto aiheuttaa uusia strategisia pohdintoja.

Työssä selvitetään, mitä uusiutuvien tuotantolaitosten liittäminen sähköverkkoon aiheuttaa fyysiselle verkolle. Lisäksi tutkitaan, millaisia vaihtoehtoja kotitalouden omatuottajalla on valitessaan itselleen sopivaa tuotantolaitteistoa. Sähköverkkoyhtiön kannalta kerrotaan kuormitusmalleista ja uusiutuvan tuotannon vaikutuksista niihin sekä tutkitaan investoimista sähkön toimitusvarmuuteen.

Sähkön laadun tarkastelun tuloksena saatiin selville, että nopeat jännitemuutokset ja jännitetasen muutokset pitää säilyä standardien rajoissa. Samalla selvitettiin liitettävän laitoksen maksimiteho, kun suurin sallittu vikavirta tiedetään. Verkon suojauksen tutkimisen tuloksena saatiin selvitys erilaisista suojareleistä ja -laitteista sekä niille vaadituista asetusarvoista. Vikatilanteiden analyysissä kerrottiin, millaisia häiriöitä voi aiheutua, jos suojaus ei toimi asianmukaisesti.

Kotitaloustuottajan näkökulman tutkimuksesta huomattiin, että tuotantolaitteistojen hinnat vaihtelevat niiden tehon mukaan. Tehokkaimpien laitteistojen tapauksessa kustannusten ja säästöjen vertailussa huomattiin, että järjestelmien hankinta takaisinmaksuajan puitteissa ei ole vielä tarpeeksi kannattavaa. Sen perusteella todettiin, että hankintamenojen pitäisi laskea tai säästöjen vastaavasti nousta, jotta investointi muuttuisi houkuttelevammaksi. Sähköverkkoyhtiön näkökulmasta todettiin, että kuormitusmallit muuttuvat uuden tuotannon liittämisen myötä. Lisäksi selvitettiin, että verkkoyhtiöt pohtivat investoimista tulevaisuuden mikroverkkoihin, mutta vielä tällä hetkellä rakennetaan maakaapelia sähkön jakelun luotettavuuden lisäämiseksi.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ÄLYKÄS SÄHKÖVERKKO JA UUSIUTUVAT SÄHKÖENERGIA TEKNOLOGIAT	3
2.1	Sähkönjakeluun liittyvät haasteet	3
2.2	Älykäs sähköverkko	4
2.3	Sähköntuotanto ja -kulutus Suomessa	6
2.3.1	Tuulivoima	9
2.3.2	Aurinkosähkö	11
2.4	Hajautettu sähköntuotanto	12
3.	KOTITALOUDEN OMAN SÄHKÖNTUOTANNON LIITTÄMINEN SÄHKÖVERKKOON	13
3.1	Vaatimukset pientuottajalle	13
3.2	Laitteisto	14
4.	KOTITALOUDEN OMAN SÄHKÖNTUOTANNON VAIKUTUKSET	18
4.1	Älykkään sähköverkon näkökulma	18
4.1.1	Sähkön laatu	19
4.1.2	Suojaus ja turvallisuus	22
4.1.3	Mahdolliset vikatilanteet	24
4.2	Kotitaloustuottajan näkökulma	27
4.3	Sähköverkkoyhtiön näkökulma	30
5.	TULEVAISUUS	32
6	YHTEENVETO	34
	LÄHTEET	36

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMI	engl. Advanced Meter Infrastructure, kehittyneempi mittarin luenta
AMR	engl. Automatic Meter Reading, automaattinen mittarin luenta
CHP	engl. Combined Heat and Power, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
EU	Euroopan unioni
GENELEC	engl. European Committee for Electrotechnical Standardization, eurooppalainen sähköalan standardisointiorganisaatio
IEC	engl. International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardisointiorganisaatio
IoT	engl. Internet of Things, tietoliikenneverkkoon kytketyt sähkölaitteet
LoM	engl. Loss of Mains, tuotantolaitoksen saarekekäyttö
Nord Pool	Sähköpörssi
PJK	pikajälleenkytkentä
SFS	Suomen standardisimisliitto
Smart Grid	älykäs sähköverkko

1. JOHDANTO

Teknologian ja kotitalouksien sähkölaitteiden määrän kasvu aiheuttaa suurempaa kysyntää energian saannille. Tästä seuraa se, että sähköä täytyy myös tuottaa tämän tarpeen täyttämiseksi. Toisaalta teknologiakehityksen ansiosta laitteet ovat energiatehokkaampia ja tästä syystä energian tarve tasaantuu tulevaisuudessa. Ilmaston lämpenemiseen havahduminen on omalta osaltaan myös saanut aikaan lakien ja säädösten velvoittamia uudistuksia, joiden toteuttamiseen useat valtiot ovat sitoutuneet. Näin pystytään todella saavuttamaan konkreettisia tavoitteita ilmastomuutoksen ehkäisemiseksi. Tämä on saanut aikaan myös sen, että investointeja lisätään jatkuvasti päästöttömiin ratkaisuihin niin teollisuudessa, energian tuotannossa kuin liikenteessäkin. Sähköntuotanto on suurimpia haitallisten päästöjen aiheuttajia, joten kiinnostus uusiutuvien tuotantomuotojen käyttöön on koko ajan lisääntynyt ja se kasvaa edelleen. Yksittäinen kuluttajakin voi vaikuttaa omilla valinnoillaan ilmaston lämpenemiseen, esimerkiksi tuottamalla osan kuluttamastaan sähköstä itse uusiutuvien tuotantomuotojen avulla tai vaihtamalla polttomoottoriajoneuvonsa sähköautoon.

Teknologian kehitys jo itsessään mahdollistaa helpomman sähköverkkojen hallinnan ja kunnossapidon. Laitteiden välisen kommunikoinnin ja tiedon siirron avulla verkon jatkuva-aikainen valvonta on helpompaa niin vikojen kuin sähkön hinnankin osalta. Tällä tavoin esimerkiksi kunnossapitoon, vikojen ennaltaehkäisyyn tai korjaamiseen sekä sähkön kulutukseen ja tuotantoon liittyviä päätöksentekoprosesseja voidaan nopeuttaa. Hajautetun tuotannon liittäminen vaatii älykkään sähköverkon eli kehittyneen sähköenergiajärjestelmän. Se yhdistää älykkäiden laitteidensa ja muiden ominaisuuksiensa avulla kysynnän ja tuotannon helpommin toisiinsa.

Tämä työ esittelee tavallisen oma-kotitaloasujan mahdollisuuksia tuottaa sähköä itse. Tuotantomuodoista tarkastelussa keskitytään tuulivoimaan ja aurinkosähköön, sillä ne ovat yleisimpiä tapoja kotitaloustuottajille. Koska kyseessä on omakotitaloasujan tuotanto ja kulutus, tarkastelu rajataan pienjänniteverkon tasolle eli 400 V:n verkkoon. Hajautettua tuotantoa voi olla keskijänniteverkossakin, mutta tällöin kyseessä ovat ennemminkin isommat tuulivoima- tai aurinkosähköpuistot.

Aluksi työssä kerrotaan, millaisia haasteita energian tuotannossa ja nykyisellä sähköverkolla on. Sen jälkeen esitellään ratkaisuna älykäs sähköverkko ja sen ominaisuudet. Lisäksi kerrotaan taustaa Suomen sähköntuotannosta ja -kulutuksesta sekä tuulivoiman ja aurinkosähkön tekniikasta. Kolmannessa luvussa käydään läpi, mitä vaatimuksia tuotannon liittäminen verkkoon vaatii kotitaloustuottajalta ja esitellään tarvittavaa laitteistoa.

Seuraavassa luvussa tutkitaan uuden tuotannon lisäämisestä aiheutuvia vaikutuksia fyysiselle verkolle, kotitaloustuottajalle sekä sähköverkkoyhtiölle. Lopuksi esitellään tulevaisuuden teknologioita ja tehdään yhteenveto tärkeimmistä huomioista.

2. ÄLYKÄS SÄHKÖVERKKO JA UUSIUTUVAT SÄHKÖENERGIA TEKNOLOGIAT

Luvussa kerrotaan ongelmia, joita nykyiseen sähköntuotantoon ja sähköverkon toiminnallisuuteen liittyy. Lisäksi esitellään älykkään sähköverkon konsepti ja sen erilaiset mahdollisuudet. Uusiutuvista sähköenergiateknologioista tutustutaan tuulivoimaan ja aurinkosähköön. Lopuksi määritellään hajautettu sähköntuotanto.

2.1 Sähkönjakeluun liittyvät haasteet

Sähkönjakelussa tämän hetken ja tulevaisuuden suurimmat haasteet ovat koko ajan kasvava energian tarve sekä ilmastonmuutos. Lisäksi väestönkasvu, vanhan teknologian riittämättömyys, energian varastointi, sähköntuotannon kapasiteetin rajallisuus, yksisuuntainen tehon- ja tiedonsiirto, fossiilisten polttoaineiden kuluminen ja joustamattomuus aiheuttavat omat ongelmansa vanhalle sähköverkolle. [1] Mitä enemmän sähkölaitteita käytetään, sitä enemmän sähköntuotantoa tarvitaan. Muun teknologian kehittyessä myös sähköverkon täytyy pystyä vastaamaan uusiin vaatimuksiin. Fossiilisten polttoaineiden käyttö sähköntuotannossa kuluttaa luonnonvaroja ja se lisää myös haitallisten päästöjen määrää, mikä omalta osaltaan edistää ilmaston lämpenemistä.

Kasvavat sähkönkulutuspiikit eli ajan hetket, jolloin energian yhtäaikainen kulutus on korkeimmillaan, aiheuttavat tuotantokapasiteetille uusia vaatimuksia. Kuluvan vuoden 2018 helmikuussa kylmänä talviaamuna Suomessa aiheutui sähkönkulutuksessa piikki, jonka suuruus oli yli 13 700 MW [2]. Kaikkien aikojen Suomen ennätys saatiin tammi-kuun 7. päivänä illalla klo 17-18 vuonna 2016, jolloin sähkön yhtäaikainen kulutus oli 15 177 MW. Suomen oma tuotantokapasiteetti 10 889 MW oli tuolloin miltei täysin käytössä. Loput kulutuksesta katettiin ulkomaan tuonnilla. [3] Yleisesti voidaan todeta, että sähkönkulutuspiikit ajoittuvat talveen pakkasien aikaan, jolloin kiinteistöjen sähkölämmitys vaatii paljon energiaa. Suomessa vielä sähkönkulutuspiikit on pystytty kattamaan omalla sähköntuotannolla ja -tuonnilla ulkomailta. Jatkossa voi kuitenkin tulla tilanteita, että nykyinen kapasiteetti ei riitäkään, ja tuotantoa tai vastaavasti tuontia on lisättävä.

Sähköverkkoyhtiöiden kannalta kiristyvät lainsäädännölliset vaatimukset sähköntoimintuksissa aiheuttavat tarvetta investointeihin ja uusiutumiseen. Sähkömarkkinalain 51 §:n mukaan taajamassa sähkönjakelun keskeytys saa olla enintään 6 tuntia ja muualla kuin taajamassa 36 tuntia [4]. Tämä onkin pakottanut sähköverkkoyhtiöt investoimaan varmempaan sähkönjakeluun rakentamalla sääolosuhteista riippumatonta verkkoa maakaapelioimalla tai siirtämällä olemassa olevia avojohtoja pois metsistä puuttomille alueille, kuten tienvarsiin.

Verkkoyhtiöt tavoittelevat yhä suurempaa voittoa, jolle kuitenkin on säädetty maksimiarvo eli niin kutsuttu kohtuullinen tuotto. Näin ollen taloudellisesti tehokkaiisiin ja joustaviin ratkaisuihin pyritään pääsemään. [5] Toisaalta verkon kehittämiseen ja investointeihin liittyy erilaisia kannustimia, joilla samalla varmistetaan verkon kunnosta huolehtiminen [6].

Sähköntuotanto aiheuttaa Suomessa suurimmat hiilidioksidipäästöt [7]. Ilmaston lämpeneminen on ollutkin pidemmän aikaa globaali ongelma ja sen hidastamiseksi on pyritty löytämään ratkaisuja niin teollisuudessa kuin yksittäisen kuluttajan valinnoissakin. Pariisin ilmastopöytäkirja julkaistiin vuonna 2015. Sopimuksessa miltei kaikki maailman valtiot sitoutuivat toimiin ilmaston lämpenemisen hidastamiseksi. Konkreettinen tavoite on keskimääräisen lämpötilan nousun pysyminen alle kahdessa asteessa esiteolliseen aikaan verrattuna. [8] Tämän myötä myös Suomi sai omat velvoitteensa. Vuoteen 2030 mennessä Euroopan unionin (EU) Suomelle asettama tavoite on vähentää päästöjä 39 %. Suurimmat päästöt aiheutuvat liikenteestä ja sähköntuotannosta. Erityisesti tärkeää on fossiilisten polttoaineiden vähentäminen ja korvaaminen uusiutuvilla energialähteillä. [9] Vuoteen 2020 Suomelle asetettu tavoite uusiutuvan energiantuotannon lisäämisestä 38 %:lla on jo täytetty [10]. Päästöille asetetut rajoitteet ja päästökauppa eli päästöoikeuskauppa pyrkivät myös ohjaamaan tilannetta kohti ympäristöystävällisempää maailmaa [11]. Suomen tavoite on saavuttaa täysin hiilidioksidipäästötön sähköenergiajärjestelmä viimeistään vuonna 2050 [12].

2.2 Älykäs sähköverkko

Älykkään sähköverkon (Smart Grid) määrittelyssä on vaikeaa löytää yksiselitteistä tapaa. Sen erottaa kuitenkin tavallisesta jakeluverkosta kehittyneemmän automaation ja toiminnallisuuden ansiosta. Nykypäivän sähköverkon ominaisuudet sähkönjakelussa ovat rajalliset teknologian, kysynnän vaihteluun reagoimisen ja luotettavan sähkönjakelun osalta. Tähän tarpeeseen älykäs sähköverkko vastaa automaationsa ja laitteiden välisen kommunikoinnin avulla, mikä mahdollistaa myös kauko-ohjauksen. Ylipäätään älykkään sähköverkon avulla voidaan

- seurata ja hallita verkkoa jatkuva-aikaisesti
- jakaa mittaustietoa ja siirtää tehoa kahteen suuntaan
- havaita vikoja nopeammin
- hyödyntää uusiutuvia sähköenergiateknologioita
- reagoida nopeammin kysynnän vaihteluihin
- varastoida energiaa
- selvittää helpommin erilaisia ongelmia ja nopeuttaa päätöksentekoa. [13]

Älykäs sähköverkko voidaan siis ymmärtää kokonaisuutena, joka parantaa sähkönjakelun tehokkuutta, luotettavuutta ja turvallisuutta nykyaikaisen automaation ja kommunikointijärjestelmän avulla käyttäen uusiutuvia ja vaihtoehtoisia energian lähteitä [1].

Älykkääseen sähköverkkoon kuuluu oleellisesti etäluettavuus ja kehittyneempi mittaus-tiedon kerääminen. Lainsäädäntö Suomessa velvoittaa, että jokaisella sähkönkuluttajalla pitää olla oma etäluettava energiamittari. Tämä on mahdollistanut myös pientuottajien saapumisen helpommin energiamarkkinoille. Etäluettavan mittarin avulla voidaan muun muassa seurata kotitalouden sähkönkulutusta tuntikohtaisesti. [5] Lisää tietoa älykkäistä mittareista kerrotaan kappaleessa 3.2.

Kun puhutaan kuormanohjauksesta, tarkoitetaan sähkönkulutuksen siirtämistä ajanhetkille, jolloin esimerkiksi sähkön hinta on halvempi tai kulutusta on verkossa vähemmän. Näin myös hetkellisiä kulutuspiikkejä voidaan hallita. [5] Kysynnänvaihteluun voidaan myös vastata kuormituksen sijainnin muutoksilla tai kytkemällä niitä kokonaan irti verkosta [14].

Sähköasemat ovat sähkönjakelussa kriittisten laitteiden sijaintipaikkoja. Muuntajat, mittalaitteet ja erilaiset suojalaitteet on monesti sijoitettu sähköasemien yhteyteen. Sähköasemaa voidaankin pitää älykkään sähköverkon automaation keskittymänä. Älykkäät mittalaitteet kommunikoivat keskenään ja antavat jatkuvaa informaatiota verkon tilasta valvomoon. [15] Näin pystytään nopeammin havaitsemaan verkossa olevia vikoja ja häiriöitä, jolloin niiden korjaaminenkin voidaan aloittaa aikaisemmin. Kauko-ohjattavien erottimien avulla pystytään eristämään kokonaisia, viallisia verkkoja tai verkon osia irti toimivasta verkosta. Vastaavasti pystytään kytkemään varasyöttöyhteyksiä nopeammin käyttöön. Näin saadaan turvattua sähkönsaanti vaihtoehtoista reittiä pitkin.

Tulevaisuudessa kysynnän on ajateltu seuraavan tuotantoa paremmin kuin se on tähän mennessä tehnyt [16]. Kysyntäjousto onkin yksi tärkeimmistä älykkään sähköverkon ominaisuuksista, sillä se ohjaa kulutusta halvempien kulutustuntien tai matalampien yhtäaikaisten kuormitusten hetkille. Kuormituksen ja tuotannon vakauttamisella tarkoitetaan tehotasapainon hallintaa. Pientuottaja voi hyötyä kysyntäjoustosta, mikäli tämän tuotanto vähentää tarvetta jakeluverkosta ostetulle sähkölle. [17]

Sähkönjakelun toimitusvarmuutta, kuormien hallintaa ja varautumista kysynnän muutoksiin voidaan parantaa energian varastoinnilla. Tasapaino voi muuttua verkossa uusien, pienempien tuotantolaitosten ja kulutuspiikkien myötä, mikä heikentää sähkön laatua. Näihin ongelmiin energiavarastot pystyvät vastaamaan. [18] Kun sähkön kulutus on suuri tai hinta korkea, voidaan käyttää akkuihin varastoitua energiaa. Vastaavasti tuotannon ollessa kulutusta suurempaa ja sähkön hinnan ollessa pienempi ylimääräinen energia kannattaa varastoida. Sähköautojen voidaan myös ajatella olevan energiavarastoja, kun niitä ladataan. Tulevaisuudessa laajeneva sähköautojen infrastruktuuri eli latauspisteiden muodostama kokonaisuus luokitellaan myös osaksi älykästä sähköverkkoa. [19]

Älykäs sähköverkko antaa myös mahdollisuuden hajautetumpaan sähköntuotantojärjestelmään, johon yleisesti liitetään uusiutuvaa sähköntuotantoa, kuten tuuli- tai aurinkovoimaa. Hajautettu tuotanto voidaan myös nähdä toimitusvarmuuden kannalta positiivisena ja edistyksellisenä keinona, sillä se antaa mahdollisuuden varasyöttöyhteyksien lisäämiseen. Monesti hajautettu tuotanto on lähellä kulutusta, jolloin siirtoetäisyydet ovat lyhyet. Lisätietoa hajautetusta tuotannosta kerrotaan kappaleessa 2.4.

Kuva 1 havainnollistaa älykkään sähköverkon konseptin. Keskitettyä sähköntuotantoa käytetään edelleen muun muassa ydinvoiman ja isompien aurinko- ja tuulivoimapuistojen muodossa. Siihen voidaan yhdistää hajautettu tuotanto, älykkäät talot, sähköiset kuluneuvot, ja mikroverkot. Lisäksi akkujen käytön määrä kasvaa ja kiinteistöillä alkaa olla omia energiavarastojaan. Kaikkea tätä hallinnoidaan älykkään tiedon jakamisen ja etäluettavuuden avulla.



Kuva 1. Älykäs sähköverkko [20].

Suomi on ollut vahva edelläkävijä älykkään sähköverkon kehittämisessä. Erityisesti etäluettavien mittareiden kehityksessä Suomi on ollut kärkimaiden joukossa ja esimerkiksi tuntikulutuksen mittaamisen kehitys on pitkälti suomalaisten ansiota. Monet yhtiöt omaavat pitkät perinteet suomalaisessa energiateollisuudessa ja ne ovat olleet avainasemassa kehityksen kannalta. Lisäksi Suomen vahva osaaminen tietotekniikan saralla on auttanut älykkään sähköverkon tietoliikenneyhteyksien kehityksessä. [21]

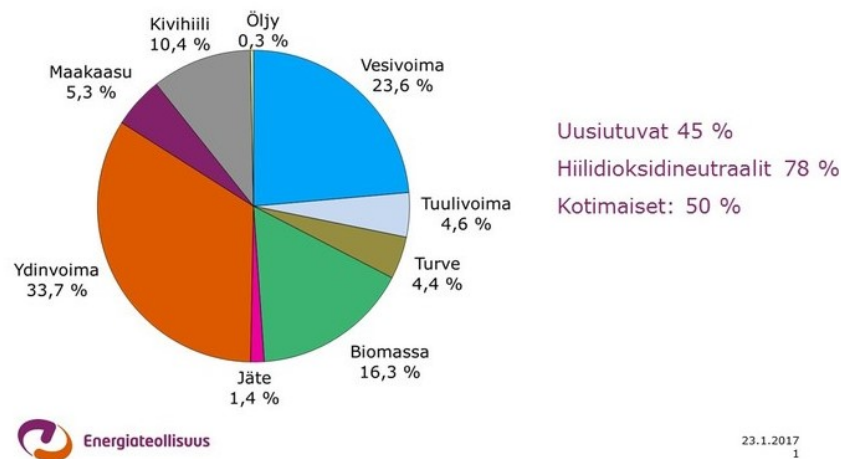
2.3 Sähköntuotanto ja -kulutus Suomessa

Suomen sähköntuotantorakenne verrattuna moneen muuhun valtioon on kokonaisuudessaan varsin hajautettu. Laaja-alainen ja monimuotoinen tuotantojärjestelmä lisää sähköjakelun varmuutta. Kuten kuvasta 2 huomataan, Suomen sähköntuotanto vuonna 2016 oli 66,1 TWh. Kuvasta voidaan myös havaita ydinvoima olevan yleisin sähköntuotanto-

muoto Suomessa. Sen kokonaiskapasiteetti on tällä hetkellä 2750 MW [22]. Suomen viidennen ydinvoimalan, Olkiluoto 3, valmistuminen on viivästynyt jo vuosilla. Se lisäisi ydinvoiman kapasiteettia 1600 MW:lla. Alun perin Olkiluoto 3 piti olla käytössä jo vuonna 2009, mutta nykyisen aikataulun mukaan tuotanto voidaan aloittaa vasta toukokuussa 2019. [23] Pyhäjoelle on lisäksi suunnitteilla kuudes ydinvoimala ja yhdessä uusien voimaloiden lisäkapasiteetti olisi 2800 MW, jolloin ydinvoima kattaisi 45 % Suomen sähköntuotannosta [22]. Näin ollen uusien voimaloiden valmistuessa ydinvoiman kapasiteetti kasvaisi kaksinkertaiseksi ja kattaisi lähes puolet Suomen sähköntuotannosta. Olkiluoto 3 myöhästymisen kymmenellä vuodella on aiheuttanut sähköntuotantoon kapasiteettinsa verran vajetta ja suunniteltu määrä joudutaan tällä hetkellä kattamaan muilla vaihtoehdoilla, kuten suuremmalla tuonnilla ulkomailta.

Vesivoimalla on Suomen sähköntuotannosta toiseksi suurin osuus. Kaikkiaan Suomen 400:sta tuotantolaitoksesta yli puolet ovat vesivoimaloita. Tuulivoiman osuus on vielä vähäinen, mutta sen määrä nousee jatkuvasti. [24] Aurinkosähkön osuus on tuulivoimaa-kin pienempi ollessaan noin promillen kokonaistuotannosta [25]. Hiilidioksidipäästöttömiä tuotantomuotoja kuvan 2 mukaan vuonna 2016 oli 78 %, joten päästöjä aiheuttavia energialähteitä oli enää 22 %. Määrä vähenee entisestään uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyessä.

Sähköntuotanto energialähteittäin 2016 (66,1 TWh)



Kuva 2. Sähköntuotanto energialähteittäin Suomessa vuonna 2016 [24].

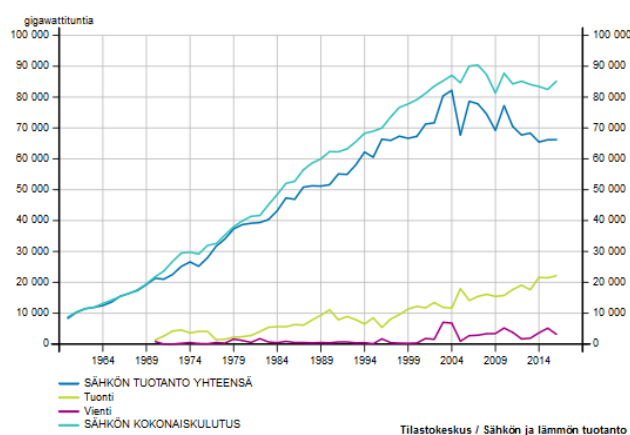
Miltei kolmannes sähköntuotannosta on yhteisesti tuotettua lämmöntuotannon kanssa, jolloin puhutaan CHP-tuotannosta. Sähköntuotantolaitoksista osa on jatkuva-aikaisesti toiminnassa täydellä kapasiteetillaan, mutta osa tuotannosta voidaan säädellä kysynnän mukaan. Kulutuksen vaihtelu on monesti nopeaa, jolloin myös tuotannon säätelyn pitää pystyä vastaamaan nopeisiin muutoksiin. Laitoksen kapasiteetti vaikuttaa siihen, kum-

massa käytössä se on. [24] Suurimmat laitokset tuottavat sähköä koko ajan ja luovat pohjan tuotannolle. Pienempiä voimaloita käytetään enemmän kysynnän mukaiseen tuotantoon.

Sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottaminen tapahtuu säätövoimalla. Koska nykyinen sähkönvarastointikyky on vielä vähäinen, sähköä täytyy tuottaa jokaisella ajanhetkellä täsmälleen tarpeen mukaan. Säätövoimalla pystytään myös reagoimaan mahdollisiin verkon häiriöihin. Säätövoiman tarpeen oletetaan kasvavan merkittävästi lähivuosina sähkönkulutuksen ja vaihteleviin sääolosuhteisiin verrannollisten aurinko- ja tuulivoiman lisääntyessä sekä CHP-tuotannon vähentyessä. Vuonna 2020 Suomen säätötarve yhden tunnin aikana oletetaan olevan 400 MW. Tällä hetkellä vesivoima on tärkein säätövoiman tuottaja, mutta kokonaistuotantokapasiteetin laajentuessa, aurinko- ja tuulivoimalla tuotetun säätövoiman määrä tulee kasvamaan. [26]

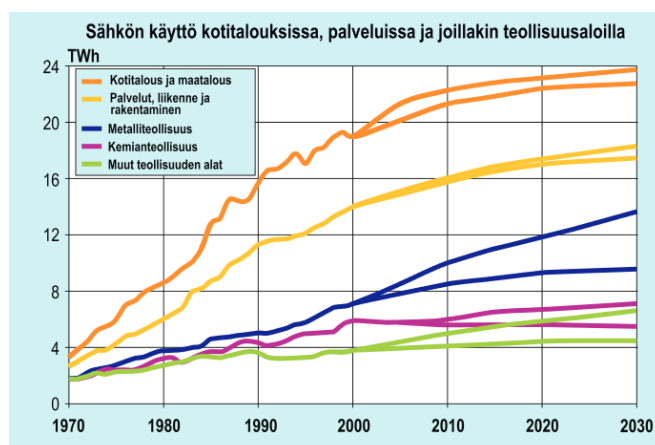
Uusiutuvalla sähköntuotannolla nimensä mukaisesti tarkoitetaan sellaisia tuotantomuotoja, joiden energian lähteitä pystytään käyttämään ilman, että ne pitkän ajan kuluessa ehtyvät [13]. Tällaisia energialähteitä ovat tuulivoima, aurinkosähkö, vesivoima, biomassa sekä muut biohajoavat kaasut ja -polttoaineet, maalämpö sekä puu-, eläin-, ja muut kasviperäiset polttoaineet. Suomessa käytetyimmät uusiutuvat energialähteet ovat vesivoima ja biomassa, mutta aurinkosähkön ja tuulivoiman käyttö on kovaa vauhtia kasvamassa [24]. Kun puhutaan kotitalouksien tuottamasta sähköstä, hyvin usein tarkoitetaan nimenomaan tuulivoimaa tai aurinkosähköä.

Suomen sähkönkulutus kokonaisuudessaan vuonna 2016 oli 85,2 TWh ja tästä kotimaisen tuotannon osuus oli 78 %. Loput katettiin ulkomaan nettotuonnilla Ruotsista, Venäjältä ja Viirosta. Nettotuonti kertoo sen määrän, joka jää jäljelle, kun tuonnista vähennetään vienti. [27] Kuvasta 3 voidaan huomata, kuinka sähköntuotanto ja -kulutus ovat kasvaneet vuosien 1960 ja 2016 välillä. Samalla voidaan tehdä havainto siitä, että viennin osuus on vähäinen ja, että kokonaiskulutusta ei ole pystytty kattamaan ainoastaan kotimaisen tuotannon avulla vaan ulkomaisia siirtoväyliä yhtä lailla tarvitaan.



Kuva 3. Suomen sähköntuotanto, -kulutus, -tuonti ja -vientä vuosina 1960-2016 [27].

Kuvassa 4 on esitetty Suomen sähkönkulutuksen jakaantuminen kotitalouden-, palveluiden- ja teollisuuden osuuksiin vuodesta 1970 lähtien. Ennuste on laadittu vuoteen 2030 asti. Kuvasta voidaan havaita, että kotitalouksien osuus kokonaiskulutuksesta on koko ajan ollut suurin ja saman tilanteen ennustetaan säilyvän myös tulevinä vuosina. Lisäksi jokaisen segmentin kulutus on kasvanut, mutta niiden väliset suhteet ovat silti pysyneet melko samoina. Kuvasta voidaan nähdä, että kotitalouksien kokonaiskulutus Suomessa tulee ennusteen mukaan nousemaan 24 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä.



Kuva 4. Suomen vuosittainen sähkönkulutus kotitalouksien, palveluiden ja teollisuuden osalta [12].

Kotitalouksien oman tuotannon lisääntyessä, tarve jakeluverkosta otettavalle sähkölle pienenee. Sen myötä verkossa siirrettävän tehon kapasiteetista jää suurempi osuus muiden kuin kotitalouksien käyttöön, kuten esimerkiksi teollisuuteen.

2.3.1 Tuulivoima

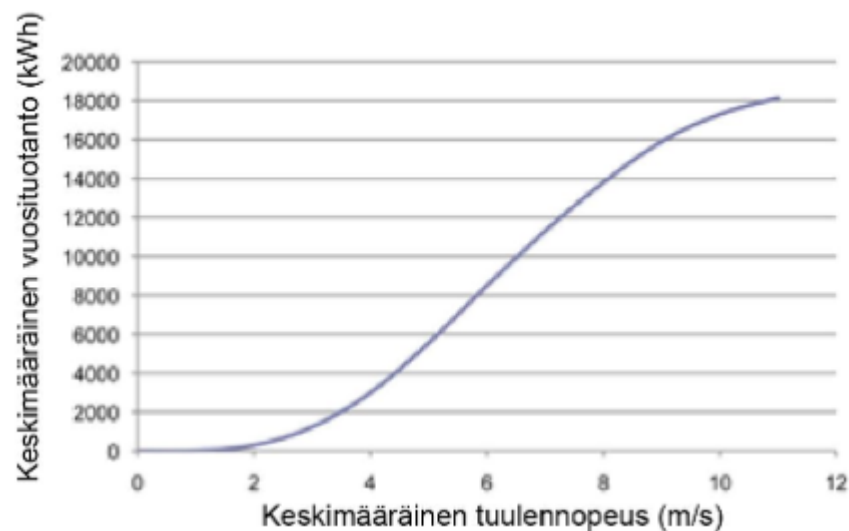
Tuulivoiman hyödyntäminen sähköntuotannossa perustuu liike-energian muuttamiseen sähköksi. Korkealla ilmassa tuuli pyörittää turbiinia, joka edelleen pyörittää liike-energian sähköksi muuttavaa generaattorin roottoria. [28] Tuulivoimaloita on kahden tyyppiä: vaaka-akseli- ja pystyakselivoimaloita. Paremman hyötysuhteen myötä vaaka-akseliset ovat yleisempiä. Hyötysuhde on noin 50 % ja voimalan käyttöikä on tyypillisesti 20-25 vuotta. Häviöt syntyvät tuulen virtauksen vaihtelusta, sillä voimala pystyy tuottamaan sähköä vain pyörimisakselia vastaan kohtisuorasta virtauksesta. Lisäksi häviöt johtuvat ilmapainon laajentumisesta sekä generaattorissa, muuntajassa tai kaapeleissa tapahtuvista tehohäviöistä sekä voimansiirron mekaanisista häviöistä. [29]

Tuulivoimala vaatii tuuliset olosuhteet mahdollisimman usein ollakseen tehokas ja hyödyllinen. Näin ollen se ei ole kaikkialla optimaalisin ratkaisu. Sopivimmat sijoituspaikat ovat tuuliset peltoaukeat, kallioiden ja mäkien huiput tai järvien ja meren rannat. Suomessa mahdollisia sijainteja ovat nimenomaan rannikot ja Lapin tunturihuiput. Muita si-

jaintipaikan valinnassa tärkeitä seikkoja ovat sähköverkon läheisyys häviöiden minimoimiseksi, meluhaitat lähellä asutusta ja esteettiset asiat, kuten vaikutus maisemaan. [30] Lisäksi esimerkiksi lähellä olevat tiet rakennustyötä ja käytönaikana tehtävää kunnossapitoa varten vaikuttavat päätöksiin.

Suomessa tuulivoima on yleistynyt etenkin vuoden 2011 jälkeen, jolloin syöttötariffijärjestelmä uudistui. Tämän hetkinen tavoite on saavuttaa vuotuinen 6 TWh:n tuulivoiman tuotanto viimeistään vuonna 2020. Kyseinen tavoite on seurausta Suomen hallituksen tämän hetkisestä ilmasto- ja energiastrategiasta. Kaikesta huolimatta tuulivoiman määrä ja osuus koko sähköntuotannosta on edelleen pieni vertailussa useisiin maihin. [30] Kokonaisuudessaan tuulivoiman kapasiteetti vuonna 2017 oli 2044 MW ja yhteensä voimaloita oli 700. Ne kattoivat tuotannollaan kaikkiaan 5,6 % koko Suomen kulutuksesta. Suurimmat voimalat ovat kapasiteetiltaan 5 MW, mutta tulevaisuudessa niiden koko voi kasvaa yli 7 MW:iin. [28] Voimaloiden fyysinen koko tyypillisesti kasvaa tehon kasvaessa [31].

Kuvassa 5 on esitetty tuulivoimalan vuosituottokäyrä, josta ilmenee keskimääräisen vuodessa tuotetun energian ja tuulennopeuden verrannollisuus. Välillä 2 m/s ja 10 m/s huomataan, että tuotanto kasvaa varsin voimakkaasti. Tuotannon kasvu hidastuu tuulennopeuden ollessa yli 10 m/s. Näin ollen voidaan todeta, että tuotannon määrä ei tietyn rajan jälkeen kasva merkittävästi, vaikka tuulennopeus kasvaisikin.



Kuva 5. Tuulivoimalan vuosituottokäyrä [32].

Pientuulivoimalla tarkoitetaan nimellisteholtaan enintään 50 kW:n voimaloita. Ne ovat käyttökelpoisia hajautettuun sähköntuotantoon ja niitä käytetäänkin paljon kotitalouden ja maatalouden sähköntuotannossa. Lisätuotanto voi mahdollistaa omavaraisen sähkön tuotannon tai toimia yhdessä jakeluverkon kanssa. [33]

2.3.2 Aurinkosähkö

Aurinkosähkön toiminta perustuu nimensä mukaisesti auringon säteilyyn, jonka energiamäärä on huomattavan suuri. Säteilyn teho maanpinnalla on 170 000 TW. Suuresta energiasta ei saada kerättyä talteen kuin murto-osa, joten sen hyödyntämisessä paremmin riittää vielä haasteita. Vaikeuksia lisää etenkin Suomessa voimakkaat vaihtelut säteilyn määrässä vuodenaikojen mukaan. Vaihtelut lisääntyvät, mitä pohjoisemmasta osasta on kyse. [34] Auringon suoran säteilyn lisäksi puhutaan hajasäteilystä, jolla tarkoitetaan ilmakehän, pilvien ja maanpinnan aiheuttamaa säteilyä. Suomessa hajasäteilyn osuus aurinkosähkön tuotannossa on suoraa säteilyä suurempi. Säteily sisältää fotoneja, jotka kuljettavat energiaa. Fotonien osuessa aurinkokennoon ne luovuttavat energiansa kennon elektroneille, jotka virittyessään muodostavat sähkövirran kennon virtajohtimiin. [35] Yhdistämällä pienempiä kennoja yhdeksi suuremmaksi levyksi voidaan rakentaa aurinkopaneeleja. Todellisuudessa aurinkopaneeli voidaan luokitella elektroniseksi puolijohteeksi, jonka ylä- ja alapinnan väliin auringon säteily muodostaa jännitteen. Muuttamalla sarjaankytkettävien kennojen määrää voidaan vaikuttaa jännitteen suuruuteen. [34] Aurinkopaneelien käyttöikä on 30 vuotta ja takuuta järjestelmille myönnetään yleensä 25 vuotta [36].

Aurinkopaneelit on tavallisesti valmistettu kiteisestä piistä. Lisäksi valmistuksessa käytetään usein kadmium-telluuria (CdTe) ja kupari-indiumseleeniä (CuInSe₂), joista voidaan valmistaa ohutkalvokennoja. Kiderakenteen puolesta kennot voidaan jaotella yksikiteisiin, monikiteisiin ja amorfisiin piikennoihin. Amorfisten hyötysuhde on 5-7 %. Monikiteisillä kennoilla hyötysuhde on vastaavasti 13-15 %. Yksikiteisillä on laboratorioolosuhteissa päästy jopa 25 %:iin, mutta kaupallisissa versioissa kuitenkin tyypillisesti puhutaan 14-17 %:sta. Ohutkalvokennojen hyötysuhde on puolestaan 16 %. [31]

Kuvassa 6 on tilastoitu auringonsäteilyn määrää, joka on kerätty 45 asteen kulmaan, etelään päin asennetuilla aurinkopaneeleilla. Asentamalla paneelit kyseisellä tavalla saadaan säteilyä kerättyä paremmin talteen [35]. Kuvasta voidaan havaita auringon säteilyn määrän Suomessa olevan enimmillään kesällä, ja etelän vuotuisen auringon säteilyn olevan suurempaa kuin pohjoisen.



Kuva 6. Vasemmalla on auringonsäteilyn kuukausittainen määrä neliometriä kohden ja oikealla vuotuinen säteily Suomen eri kaupungeissa [35].

Piikkiwatti (W_p) tarkoittaa aurinkopaneelin nimellistehoa, joka on tuotettu standardiolo-suhteissa eli 25 asteen lämpötilassa ja tehon ollessa hetkellisesti 1000 W/m^2 . Etelä-Suomessa yhden W_p :n tehoisella järjestelmällä voidaan tuottaa energiaa 800-1000 kWh vuodessa. Pohjois-Suomessa vastaava määrä on 700-900 kWh. [36]

2.4 Hajautettu sähköntuotanto

Hajautetulle sähköntuotannolle ei ole yhtä ainoaa, selkeää määritelmää. Pääasiassa sillä tarkoitetaan pienimuotoista sähköntuotantoa. Hajautettu tuotanto voidaan määritellä myös sen mukaan, minkä jännitetasen verkossa se sijaitsee. Yleensä hajautettua tuotantoa on keski- ja pienjänniteverkossa. Jakokriteerinä voidaan myös pitää voimalan nimellistehoa. Hajautettu tuotanto usein sijoitetaan silmukoituun verkkoon lähelle kulutuspistettä, jolloin se syöttää sähköä suoraan asiakkaalle. Muita tyypillisiä hajautetun tuotannon ominaisuuksia ovat: uusiutuvien tuotantomuotojen hyödyntäminen, yhteistuotanto keskitetyn sähköntuotannon kanssa tai se, että tuotettua sähköä ei syötetä ollenkaan verkkoon vaan se kulutetaan paikan päällä. [37] Mikrotuotannolla tarkoitetaan alle 100 kVA:n tuotantoa. Sen ylittävä tuotanto 2 MVA:iin asti on puolestaan pientuotantoa. [38] Kokonaisuudessaan hajautetun tuotannon voidaan ajatella olevan pienimuotoisempaa kuin suurten keskitettyjen voimaloiden tuotannon. Tehonsiirtoetäisyydet kuluttajalle ovat myös usein lyhyemmät hajautetussa kuin keskitetyssä tuotannossa.

Teollisuuden alkuaikoina puhuttiin vain hajautetusta sähköntuotannosta, sillä pienet voimalat tuottivat koko lähialueen sähkönkulutuksen vaatiman määrän. Teollisuutta rakennettiin paljon esimerkiksi koskien äärelle, jolloin tehtaot pystyivät kattamaan kulutuksensa omalla tuotannollaan. Tuotannossa käytettiin tasavirtaa, mutta myöhemmin ymmärrettiin mahdollisuus suurempien tehojen siirtämiseen vaihtovirran avulla. Sen myötä tuotantoa ryhdyttiin keskittämään ja suurempia voimaloita rakennettiin. Samalla ne haluttiin sijoittaa kaupunkien ulkopuolelle, mikä myös johti siihen, että tehonsiirtoetäisyydet kasvoivat. [37]

Markkinoiden vapautuminen ja ympäristön suojelu ovat nostaneet jälleen kiinnostusta hajautettuun sähköntuotantoon. Reagoiminen muuttuviin markkinoihin on helpompaa hajautetun sähköntuotannon myötä. Se antaa myös mahdollisuuden valikoida, millä tavalla tuotettua sähköä halutaan kuluttaa tai myydä. [37] Edellä mainittujen huomioiden perusteella voidaan todeta, että hajautettu tuotanto pystyy vastaamaan kuluttajien niin kutsuttuihin vihreisiin arvoihin ja, että se todella on hyvä tapa päästöjen vähentämiseen.

3. KOTITALOUDEN OMAN SÄHKÖNTUOTANNON LIITTÄMINEN SÄHKÖVERKKOON

Luvussa kerrotaan, millaisia vaatimuksia uudelle sähköntuottajalle asetetaan, jotta olemassa olevaan sähköverkkoon on mahdollista liittyä. Laitteistotarkastelussa puolestaan esitellään sähköntuottajan kannalta oleelliset tuotantojärjestelmään kuuluvat komponentit.

3.1 Vaatimukset pientuottajalle

Kotitalousasukkaan harkitessa oman sähköntuotannon hankintaa, tulee ensimmäisenä selvittää kaupungin tai kunnan rakennusvalvontaviranomaiselta, että tuleva tuotantolaitos on rakennuslupien ja toimenpidelupien kannalta hyväksyttävä rakentaa ja, että kyseiset luvat on myönnetty. Jos pientuotanto sijaitsee kaavoitetun alueen ulkopuolella, yleensä rakentamiseen vaaditaan vain toimenpidelupa. Vaatimuksissa voi olla kuitenkin paikkakuntien välisiä eroja. [39]

Sähköverkon omistajalta täytyy varmistaa sähköverkon- ja turvallisuusmääräysten täyttyminen ennen kuin tuotantolaitos voidaan liittää verkkoon. Ilman sähköverkon omistajan lupaa verkkoon ei saa liittää minkäänlaista omaa tuotantoa. [39] Sähköverkon omistajalle pitää toimittaa tiedot hankittavasta tuotannosta ja sen tekniset dokumentaatiot, joista ilmenee

- laitoksen syöttämä suurin vikavirta
- tuotanto- ja verkkoonliityntälaitteen ja lisälaitteiden kilpiarvot
- suojausvaatimusten täyttyminen
- sähkön laadun vaatimusten täyttyminen
- verkkoon kytkeytymismenetelmä (automaatti/manuaali) ja kytkentäaika
- laitoksen verkosta erottamismenetelmä ja erottimen tiedot. [40]

Näin verkon omistaja tietää tuotantomuodon, puhutaanko esimerkiksi aurinkosähköstä vai tuulivoimasta, ja tehon määrän, joka aiotaan tuottaa. Tietojen ansiosta voidaan arvioida halutun tuotannon soveltuvuutta kyseisessä sijainnissa. [39]

Ennen käyttöönottoa pitää tehdä uuden tuottajan ja verkonhaltijan välinen verkkopalvelu- ja tuotannon liittymissopimus. Verkkopalvelusopimus vaaditaan, jos tuotettua sähköä syötetään verkkoon. Minkä tahansa sähköä verkkoon syöttävän laitteen pitää täyttää sille määritetyt tekniset vaatimukset. [39] Näin vikojen sattuessa pystytään takaamaan muiden verkkoon kytkettyjen laitteiden toimivuus ilman vikaantumista sekä verkon parissa työskentelevien henkilöiden turvallisuus.

Sähköverkon omistajalle ja muille asiakkaille ei saa aiheutua häiriötä uuden tuotannon lisäämisestä ja käytöstä sähköverkossa [41]. Mikäli kuitenkin häiriötilanteita muodostuu, on uuden tuotannon haltijalla korvausvelvollisuus aiheuttamastaan häiriöstä tai viasta. Uuden tuotannon lisäämisen ja sähköasennukset saa tehdä vain ammattitaitoinen henkilö, jolla on tarvittavat sähköasennusluvut voimassa. [39]

Kun tuotannolle asetetut vaatimukset ovat kunnossa, sähkön tuottajalla on oikeus liittyä sähköverkkoon. Ennen tuotantolaitteiston käyttöönottoa pitää kuitenkin verkonhaltijalta saada varmistus ja lupa tuotannon aloittamiselle [40]. Jos ylituotetulle sähkölle on myös hankittuna ostaja, tuottajalla on oikeus syöttää sähköä verkkoon. Jakeluverkon kautta myytävän sähkön ostajan tulee kuitenkin olla osallinen sähkömarkkinoilla. [39]

3.2 Laitteisto

Kotitalouden omassa sähköntuotannossa käytettävä laitteisto riippuu oleellisesti siitä, millaisesta tuotantotyyppistä on kyse. Mikäli tuotettu sähkö on tasasähköä, tarvitaan verkkoon liitännässä vaihtosuuntaaja eli invertteri. Se muuttaa tasasähkön vaihtosähköksi, jota kodin sähkölaitteet ja jakeluverkko käyttävät. Tasasähköä voidaan käyttää suoraan esimerkiksi vesivaraajan tai lämminvesipatterien lämmittämisessä. Lisäksi tuotantolaitteistoon kuuluu älykäs energiamittari, joka mittaa tuotettavan energian ja sähköverkosta otetun energian määrän. Laitteistoon oleellisesti kuuluu myös erilaiset suojalaitteet, joista lisää kappaleessa 4.1.2.

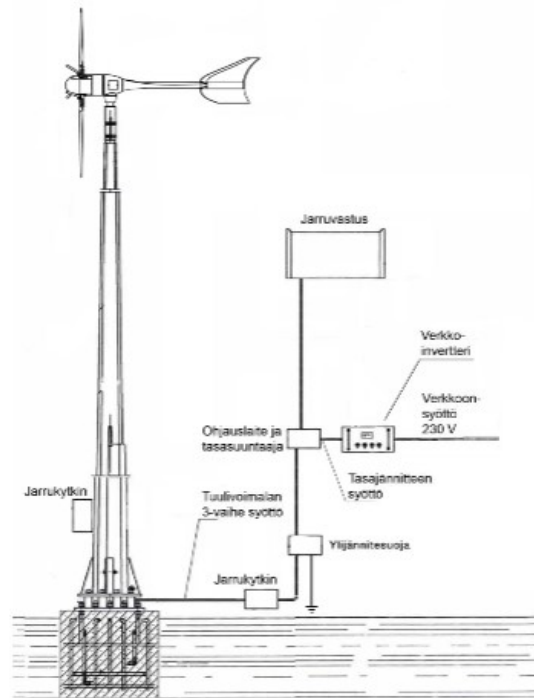
Tuotantolaitokset voidaan jakaa neljään eri käytettävään malliin, jotka ovat

- täysin muusta sähköverkosta erotettu tuotantolaitos
- jakeluverkolle vaihtoehtoinen sähkön syöttö eli varasyöttö
- käyttö jakeluverkon kanssa rinnan niin, että tuotettua sähköä ei siirretä verkkoon
- käyttö jakeluverkon kanssa rinnan niin, että tuotettu sähkö siirretään osin tai kokonaan verkkoon. [41]

Yleiset sähköturvallisuusmääräykset vaativat, että tuotantolaitteisto käsittää erotuslaitteen, jolla laitos voidaan erottaa verkosta. Sen toimintatila on kyttävä havaitsemaan eli, onko laitos käynnissä vai ei. Verkonomistajalla täytyy olla mahdollisuus päästä, milloin tahansa kyseiselle erotuslaitteelle ilman minkäänlaisia rajoitteita joko paikan päällä tai etänä valvomosta. [40]

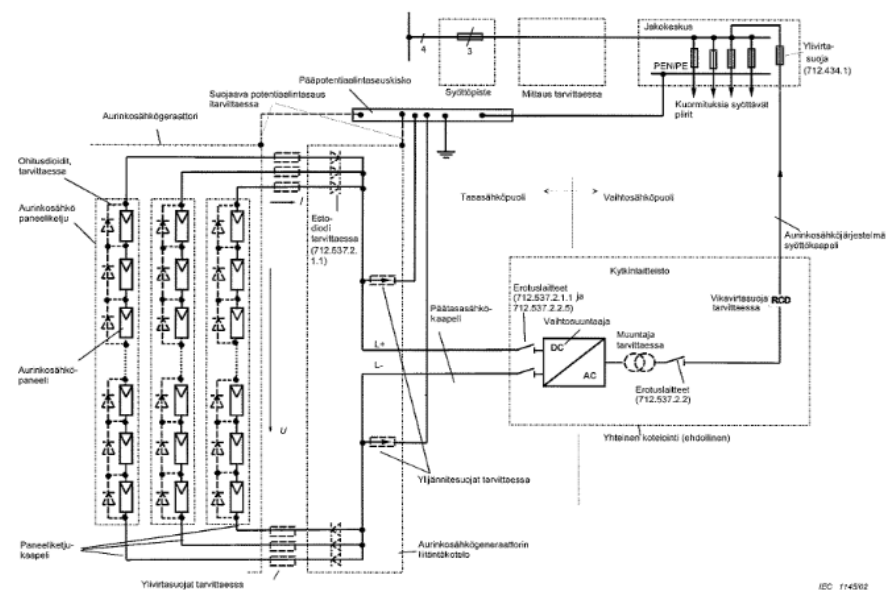
Pientuulivoimalan laitteisto on havainnollistettu kuvassa 7. Vakionopeuden omaava voimala pyörii verkon taajuuden mukaisesti ja se voidaan liittää suoraan verkkoon. Muuttuvan nopeuden omaava voimala puolestaan määrittää nopeutensa itse ja verkkoon kytkennässä käytetään tarvittaessa taajuudenmuuttajaa, joka tahdistaa tuotetun sähkön verkkovirtaa vastaavaksi. [42] Kuvan ohjauslaite tasasuuntaa tuulen mukaan vaihtelevan sähkö, jonka jälkeen invertteri muuttaa tasasähkön vaihtosähköksi. Jos tuotettua sähköä ei

kuluteta heti, se voidaan varastoida akkuihin tai kuluttaa kytkemällä käyttöön jarruvastus. Se voi tarvittaessa hidastaa voimalaa tai pysäyttää sen kokonaan. [32]



Kuva 7. Pientuulivoimalan laitteisto [32].

Kuvan 8 aurinkosähköjärjestelmä käsittää useita aurinkopaneeleja sarjaankytkettynä. Kuvasta on havaittavissa myös, kuinka invertteri on erotettavissa järjestelmästä erotuslaitteiden avulla sekä tuotannon, että verkon puolelta. Lisäksi kuvassa on esitetty muiden suojalaitteiden, kuten vikavirta-, ylivirta- ja ylijännitesuojien paikat.



Kuva 8. Aurinkosähköjärjestelmä [43].

Hybridijärjestelmällä puolestaan tarkoitetaan tuotantoa, jossa hyödynnetään useampaa kuin yhtä tuotantomuotoa [44]. Aurinkosähkö- ja tuulivoimajärjestelmä ovat myös käytävissä hybridinä.

Etäluettavat mittarit tuottavat sähkönkulutuksesta reaaliaikaista tietoa, josta on hyötyä sekä sähkönkuluttajalle että -toimittajalle. Etenkin sähkön laadun ja käyttövarmuuden tarkkailussa voidaan hyödyntää mittaustietoa. Esimerkiksi informaatiota voidaan saada sähköverkossa tapahtuvien keskeytysten määrästä ja kestoista, kytkentä- ja katkaisutilanteista sekä erilaisista häilytyksistä. Mittarit myös mahdollistavat kuormanohjauksen, jolloin kuormituspiikkejä voidaan tasata. [5] Sähkönkuluttajalle älykäs energiamittari tarjoaa mahdollisuuden taloudelliseen säästämiseen, mikä lienee kuluttajalle tärkein motiivi energiamarkkinoilla.

Sähköverkon suunnittelussa etäluettavilla mittareilla on iso merkitys. Jännitetasomittauksilla pystytään esimerkiksi havaitsemaan verkon täsmällinen tila ja sen myötä investoinnit pystytään keskittämään oikeisiin kohteisiin paremman laadun takaamiseksi. Verkkoyhtiö on velvollinen korvaamaan pitkien keskeytysten aiheuttamat haitat kuluttajalle ja tässä voidaan hyödyntää älykkään mittarin kykyä rekisteröidä katkoksia ja jännitekuoppia. Häilytysten avulla mittari kykenee kertomaan mahdollisesta katkosta. Tämän tiedon avulla voidaan tarpeen vaatiessa sekä kytkemään että katkaisemaan sähkönsyöttö kuluttajalle. Lisäksi AMR-mittari pystyy ohjaamaan kulutusta sähkön markkinahinnan tai taajuuden muutosten eli kysynnän vaihtelun mukaan tai verkkoyhtiön pyynnöstä. [5] AMI-mittari sisältää samat ominaisuudet kuin AMR-mittari, mutta se on teknologialtaan kehittyneempi mahdollistaen tiedon jaon kahteen suuntaan. Se yhdistää kehittyneet sensorit, älykkäät sähkömittarit, valvontajärjestelmät, ohjelmistot ja tiedonhallintajärjestelmät kommunikoimaan keskenään. [1] Näin ollen tiedon siirto kuluttajan ja sähkön myyjän välillä on tehokkaampaa.

Mikrotuotanto on mitattava etäluettavalla mittarilla tuntikohtaisesti. Samassa pisteessä tapahtuva kulutus ja tuotanto pitää mitata erikseen. Kulutusta ja tuotantoa ei saa netottaa vaan niiden tiedot on tallennettava erillisinä, jolloin ne ovat helposti luettavissa. Mikro-tuotanto täytyy mitata siihen erikseen tarkoitettulla tuotantolaitoksen omalla mittarilla, jolla pystytään selvittämään kulutuksen kattamiseen käytetyn oman tuotannon määrä. [40] Yhteenvetona voidaan todeta, että älykäs energiamittari tarjoaa kotitaloustuottajalle mahdollisuuden seurata omaa tuotantoaan, kulutustaan ja tarvettaan jakeluverkon sähkölle.

Vaihtosuuntaajan tehtävä on muuttaa tasasähkö vaihtosähköksi. Sen toiminta vaikuttaa sähkön laatuun ja sille on omat asetuksensa standardin SFS-EN 50438 mukaisesti. Invertteri pitää huolen siitä, että jännite ja taajuus ovat samansuuruiset jakeluverkon vastaaviin arvoihin. Sillä pystytään myös esimerkiksi ohjaamaan aurinkokennoa niin, että tuotanto on koko ajan suurin mahdollinen. Invertteri seuraa tuotetun sähkön määrää ja pystyy havaitsemaan mahdollisia vikoja, kuten ylijännitteitä. Käyttöikä voi olla jopa 20 vuotta,

mutta käytännössä sille myönnetään takuuta vain 5 vuotta. Invertteri sisältää paljon tehoelektroniikkaa ja tämän vuoksi sen vika-alttius onkin usein laitteistossa suurin. [45] Kuten kuvasta 8 nähdään, se kytketään talon omaan sähköverkkoon tuotantolaitteiston ja yleisen verkon väliin siten, että se on erotettavissa koko järjestelmästä esimerkiksi huollon vuoksi.

4. KOTITALOUDEN OMAN SÄHKÖNTUOTANNON VAIKUTUKSET

Luvussa käsitellään uuden tuotannon lisäämisestä aiheutuvia muutoksia älykkääseen sähköverkkoon. Erityisesti kiinnitetään huomiota sähkön laatuun, suojaukseen, turvallisuuteen ja mahdollisiin vikatilanteisiin. Lisäksi luvussa kerrotaan, millaisia mahdollisuuksia kotitaloustuottajalla on laitteistojen valinnan suhteen ja verrataan eri järjestelmien kustannuksia ja tehoja. Lopuksi tarkastellaan sähköverkkoyhtiön kannalta huomioon otettavia asioita uuden tuotannon liittämisenä.

4.1 Älykkään sähköverkon näkökulma

Hajautettu sähköntuotanto vaikuttaa olemassa olevaan verkkoon erityisesti suojauksen ja turvallisen verkonkäytön kannalta. Jokainen uuden tuotantolaitoksen liittäminen on tarkasteltava erikseen omina tilanteinaan [41]. Tämä siitä syystä, että laitosten tehot sekä olemassa olevan verkon ominaisuudet vaihtelevat eri liityntäpisteissä. Uudet tuotantolaitokset vaativat vahvaa automaatiota, sillä niiden pitää reagoida erilaisiin verkon tilanteisiin itsenäisesti ja tarvittaessa kyettävä erottautumaan verkosta tai kytkeytyä takaisin verkkoon. Tiedonsiirto tuotannon- ja verkon suojalaitteiden välillä on ratkaisevassa osassa ja edesauttaa järjestelmän toimintaa. Käytännössä laitteiston tulisi olla niin itseohjautuva, että sen toimintaan ei tarvitse puuttua. [31] Toisin sanoen sähköverkon älykkyys mahdollistaa hajautetun tuotannon tehokkaamman hyödyntämisen. Se edesauttaa myös hajautetun tuotannon määrän kasvua verkossa.

Alkuperäisestä sähköverkosta voidaan todeta muodostuvan älykäs, kun siihen liitetään älykkäitä komponentteja eli laitteita, jotka mahdollistavat etäkäytön ja pystyvät kommunikoimaan keskenään. Uusi tuotantolaitos vaatii osakseen älykkään energiamittarin, joka pystyy mittaamaan kahteen suuntaan siirrettävää tehon määrää. Tehon siirtyminen kahteen suuntaan on yksi tärkeimmistä vaikutuksista, jonka uuden tuotannon liittäminen verkkoon aiheuttaa. [41] Yleisesti voidaan todeta, että uudet tuotantolaitokset lisäävät erilaisia muuttuvia tilanteita verkossa.

Tuulivoimasta ja aurinkosähköstä saatava tehon määrä voi vaihdella suurestikin sääolosuhteiden mukaan, mutta esimerkiksi pienten kaasuturbiinilaitosten tuotanto on melko tasaista koko ajan. Uuden tuotannon lisäämisen vaikutuksena voi erityisesti olla jännite-tason muutokset, jännitepiikit ja -kuopat sekä muut nopeat jännitevaihtelut, yliaallot ja kokonaissäröt. Lisäksi oikosulkuvirtojen kasvu, verkon häviöt ja maadoitukset ovat myös tärkeitä tarkastelun kohteita. [41] Kotitalouden oman tuotannon tapa vaikuttaakin ratkaisevasti siihen, millaisia vaikutuksia sähköverkkoon aiheutuu. Siten pystytään hahmottamaan vaatimukset muun muassa sähkön laadulle ja suojaukselle.

Erityisesti älykäs sähköverkko kykenee paikantamaan vikapaikat nopeammin, jolloin niiden korjaaminenkin on nopeampaa. Se osaa paikantaa lähimmän tuotannon ja lisäkapasiteetin määrän sekä tavan, jolla kyseinen laitos tuottaa energiaa. [44]

4.1.1 Sähkön laatu

Sähköverkkoyhtiön tärkeimpiä tehtäviä on taata laadukkaan sähkön syöttö kuluttajille. Haasteita hajautetun tuotannon parhaassa mahdollisessa käytössä riittää. Etenkin laadun varmistaminen vaatii erilaisia toimenpiteitä, mutta toisaalta verkosta ei haluta myöskään liian monimutkaista. [41] Vaarana voi ollakin, että tietyn ominaisuuden parantaminen voikin johtaa toisen heikkenemiseen. Näin ollen täytyy priorisoida, mitkä asiat ovat tärkeitä ja mistä voidaan joustaa.

Laatuun liittyvät vaatimukset kytkeytyvät vahvasti myös kotitalouden oman tuotannon tarkasteluun. Tarkastelua voidaan tehdä sekä sähköverkon, että tuotantolaitoksen kanalta. Uusi tuotanto ei saa missään olosuhteissa huonontaa olemassa olevan verkon sähkön laatua, jolle on määriteltä SFS-, IEC- ja GENELEC -standardit. [46] Mikrotootannon liittäminen verkkoon ei saa aiheuttaa standardin SFS-EN 50160 mukaisen jännitteen laadun heikkenemistä. Mikäli mikrotootantolaitoksen toiminnasta johtuen verkon käytössä kuitenkin ilmenee ongelmia, on verkkoyhtiön puututtava ja erotettava tilanteen vaatiessa laitos kokonaan verkosta. [40]

Yleensä uuden tuotannon lisäämisen tapauksessa jännite sähköverkossa nousee. Näin ollen on tärkeää huomioida, ettei se myöskään nouse liikaa ja siten aiheuta ongelmia sähkön laadussa. Toisaalta uusi tuotanto myös helpottaa verkonhaltijaa verkon häviöiden ja jännitteen alenemien vähentämisessä. Valtaosassa tilanteista tuotannon lisääminen verkkoon ei aiheuta kuitenkaan suurta riskiä sähkön laadun heikkenemiselle. Sen sijaan huonon laadun aiheutuminen on todennäköistä, jos tuotantolaitoksen nimellisteho on verrattain todella suuri verkon oikosulkutehoon nähden. Laadun tarkastelussa erityisen tärkeitä seikkoja ovat

- standardien mukaisen jännitetason rajoissa pysyminen
- laitoksen kytkentä- ja erotustilanteet, jolloin jännitevaihtelut eivät saa muodostua liian suuriksi
- nopeiden jännitemuutosten eli välkynnän määrä. [41]

Jakeluverkkoon liitettäessä uutta tuotantoa pitää ottaa huomioon myös sen muut käyttäjät. Jännitetason muutokset eivät ole suotavia muiden kuluttajien laitteiden toiminnan kanalta. Sen vuoksi jännitetason muutoksille on laadittu omat standardit, jotka määrittävät sallitun muutoksen. Jännitetason suhteellinen muutos, joka liityntäpisteessä tapahtuu uuden tuotannon lisäämisen myötä verrattuna alkuperäiseen, on laskettavissa kaavalla

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{R_K \cdot P_N + X_K \cdot Q_N}{U^2}, \quad (1)$$

jossa ΔU on jännitetasen muutos, U on sähköverkon pääjännite, R_K on verkon oikosulkuresistanssi, P_N on tuotantolaitoksen generaattorin nimellispätöteho, X_K on verkon oikosulkureaktanssi, ja Q_N on generaattorin nimellisloisteho. [41]

Generaattorin magnetointiin voidaan vaikuttaa loistehon ja jännitteen avulla ja siten voidaan vaikuttaa loistehon suuntaan ja suuruuteen. Kun tehon suunta on generaattorista verkkoon, pätö- ja loisteho ovat positiivisia. Näin ollen generaattorin verkosta ottaman loistehon täytyy olla negatiivinen, jolloin myös jännitteenousu pienenee. Mahdollisten kondensaattoriparistojen tuottama loisteho pitää laskennassa vähentää kulutetusta loistehosta. Verkon jännitteen ollessa liian korkea vähennetään loistehon tuotantoa ja jännitteenousu pienenee. Vastaavasti jännitteen ollessa liian pieni loistehon tuotantoa kasvatetaan ja jännitteenousu kasvaa. [41]

Kuormitusvirtaan perustuva jännitteensäätö puolestaan tarkoittaa sitä, että jännitettä säädetään päämuuntajan kuormituksen mukaan. Jännitettä nostetaan kuormituksen kasvaessa ja päinvastoin. Jännitetaso voi alentua uuden tuotannon liittyessä verkkoon, sillä päämuuntajan kuormitus pienenee tuotannon kasvaessa. Sen myötä jännite ei nousekaan todellisen kuormituksen vaatimalle tasolle. Huomion arvoista on myös se, että tuotantolaitos ei pelkästään vaikuta siihen johtolähtöön, johon se on kytketty vaan kaikkiin saman päämuuntajan syöttämiin johtolähtiin. [41]

Nopeat jännitemuutokset aiheutuvat tuotantolaitoksen käynnistymisestä tai muista kytkennöistä. Välkynnällä tarkoitetaan nopeiden jännitemuutosten aiheutumista monia kertoja minuutissa. Ilmiö on havaittavissa erityisesti valaistuksessa, jolloin lamput konkreettisesti välkkyvät. Tilanteen havaitsemiseen on kehitetty omat välkkyntämittarit. Uuden tuotannon lisääminen verkkoon aiheuttaa jännitemuutoksen, joka voidaan laskea kaavalla

$$\Delta U = i_{suhde} \cdot \frac{S_n}{S_k} \cdot U_V, \quad (2)$$

jossa i_{suhde} on kytkentävirran suhde nimellisvirtaan, S_k on verkon oikosulkuteho ensimmäisessä toisen kuluttajan kanssa yhteisessä verkon pisteessä, S_n on voimalan nimellisteho ja U_V on verkon vaihejännite. Pienvoimalan liittämistä verkkoon saa aiheutua standardin mukaan enintään 5 %:n suuruinen jännitteenmuutos. Näin ollen suunnittelussa kannattaa tasoksi valita hieman pienempi arvo, kuten esimerkiksi 4 %. Sijoittamalla $\Delta U/U_V = 0,04$ kaavaan 2, saadaan muodostettua verkon oikosulkuteholle yhtälö

$$S_k \geq 25 \cdot i_{suhde} \cdot S_n, \quad (3)$$

joka määrittää sallitun rajan tuotannon verkkoon liittämiseksi. [41] Jos tuotantolaitoksen kytkeminen verkkoon tai erottaminen verkosta ei aiheuta yli 4 %:n jännitteenmuutosta ja sähkön laatu ei poikkea standardin SFS-EN 50160 rajoista, tuotanto voidaan liittää verkkoon. Tämän lisäksi pitää huomioida, ettei kytkentävirta ylitä maksimitehon määrittämää

maksimivirtaa. [40] Epätahtigeneraattoreilla i_{suhde} arvo on tavallisesti 3-8. Hyvänä yleisenä suosituksena voidaan pitää sitä, että kytkentävirta saadaan muodostettua lähelle nimellisvirran arvoa, jolloin kytkennästä ei aiheudu vaarallisen suurta ylivirtaa. [41]

Yhtälöt 2 ja 3 ovat määritelty todellisuudessa koko pientuotannolle eikä varsinaisesti ainoastaan mikrotuotannolle. Yhtälöiden avulla voidaan silti tutkia esimerkiksi, miten mikrotuotantolaitoksen maksimiteho voitaisiin määrittää. Merkitään kaavaa 3 soveltaen liitettävän laitoksen enimmäisteholle

$$S_N = \frac{S_k}{25}. \quad (4)$$

Oletetaan i_{suhde} arvoksi 1, jolloin voimalan kytkentävirta on lähellä sen nimellisvirtaa. Pienjänniteverkon oikosulkuvirran suunnitteluarvo on määritelty minimissään 250 A:iin perustuen verkon suojauseluihin. Näin ollen verkon kolmivaiheiseksi oikosulkutehoksi saadaan

$$S_k = 3 \cdot I_k \cdot U_v = 3 \cdot 250 \text{ A} \cdot 230 \text{ V} = 172,5 \text{ kVA}, \quad (5)$$

jossa U_v on verkon vaihejännite ja I_k oikosulkuvirta. Kun tämä sijoitetaan yhtälöön 4 saadaan tuotantolaitoksen maksimitehoksi

$$S_N = \frac{172,5 \text{ kVA}}{25} = 6,9 \text{ kVA}. \quad (6)$$

Yksivaiheisen tuotannon ollessa teholtaan liian suuri voi vaarana olla, että verkkoon muodostuu epätasapaino. Suurin sallittu sulakekoko yksivaiheiselle tuotannolle on 16 A. Suurin sallittu yksivaiheisen voimalan teho on 3,7 kVA. [40] Se voidaan laskea puolestaan kaavalla

$$S = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I = \frac{0,4 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot 16 \text{ A} = 3,68 \text{ kVA} \approx 3,7 \text{ kVA}, \quad (7)$$

jossa U on verkon pääjännite ja I suurin sallittu tuotannon syöttämä virta.

Häviöt tyypillisesti kasvavat, kun tehoa joudutaan siirtämään pitkiä matkoja. Näin ollen häviöt pienenevät tuotannon sijaitessa lähellä kulutusta. Häviöt sen sijaan voivat kasvaa siirrettäessä tehoa verkkoon. [31] Tuotannon ja kulutuksen tasapaino korostuu häviöitä tarkasteltaessa ja samansuuruisena ne tekevät tilanteesta stabiilin [41].

Yliaaltojännitteitä voi aiheutua, mikäli tuotantolaitokseen on liitetty paljon tehoelektroniikkaa, kuten taajuusmuuttajia tai suuntaajia. Standardin EN 50160 mukaan on asetettu raja-arvot viikon pituiselle ajalle, kuinka paljon yliaaltojännitteitä kyseisenä aikana saa esiintyä. [41] Samalla on määritetty harmoniselle kokonaissärölle 8 %:n sallittu raja liityntäpisteessä [40]. Yliaaltojännitteiden ohella myös yliaaltovirroille on säädettävä omat rajansa, sillä jännitteen säröt ovat yliaaltovirtoihin verrannollisia. Yliaaltovirrat voivat

paikallisesti olla sallituissa rajoissa, mutta yhdessä muiden verkon käyttäjien yliaaltovirtojen kanssa, ne voivat aiheuttaa ongelmia muualla verkossa. [41]

4.1.2 Suojaus ja turvallisuus

Suojauksen tärkein tavoite on varmistaa se, ettei uuden tuotannon lisääminen aiheuta ongelmia olemassa olevan verkon toimintaan. Lisäksi suojaus pitää huolen siitä, että muiden verkon käyttäjien verkkoon kytketyt laitteet eivät vaurioidu uuden tuotantolaitteiston liittämisestä tai vikaantumisen seurauksena. Verkon kunnossapidossa ja huoltotöissä ei saa myöskään aiheutua vaaraa työntekijöille, joten suojauksen tehtävä on myös ehkäistä henkilövahinkoja. [41] Yhtä lailla suojauksella pidetään huoli siitä, että sähköverkkoon ei pääse laadultaan huonoa sähköä. Jos sähköverkon jännite tai taajuus eivät ole sallittujen arvojen mukaisia, suojalaitteiden on erotettava mikrotuotantolaitos verkosta. Verkkoon kytketyminen ei myöskään ole sallittua jännitteen tai taajuuden ollessa muuta kuin taulukossa 1 esitetyt sallitut arvot. Mikrotuotannosta on suositeltavaa varoittaa kaikissa verkon osissa, joihin siitä voi aiheutua jännitteitä. Lisäksi tuottajan omassa sähkökeskuksessa on oltava merkittynä tieto mikrotuotannosta mahdollisten asennustöiden varalta. [40]

Sähköverkon kunnossapitoon, asennuksiin ja viankorjaukseen liittyvä työturvallisuus pitää olla huolellisesti varmistettu. Vaikka vikapaikka olisi erotettu syöttävästä sähköverkosta, voi jossakin kohtaa erotetussa verkossa olla tuotantolaitos tai laitoksia, jotka syöttävät virtaa toista reittiä pitkin vikapaikkaan. Tällöin puhutaan takasyötöstä. Sen vuoksi on erityisen tärkeää, että verkonhaltijalla on tiedot kaikista olemassa olevista tuotantolaitoksista. [41] Kuitenkin mahdollisuus tuntemattomiin voimaloihin on aina olemassa, jolloin takasyötön esto kannattaa varmistaa maadoittamalla huoltotyöpaikka molemmista verkon suunnista. Tuotantolaitoksen suojauksen pitää varmistaa, ettei yksinsyöttö tilannetta voi muodostua. Standardit määräävät, että laitoksen suojaukseen on sisällyttävä lisäerotuslaite kyseisten tilanteiden varalle. Lisäerotin voidaan asentaa myös verkonhaltijan toimesta, mikäli sellaista ei ole tuotantolaitoksen suojaukseen asennettu. Tällaisia erottimia voivat olla ilmajohtoverkon pylväsarokekytkin tai kaapelijakokaapin jonovarokekytkin. [40] Jos käy kuitenkin niin, että voimala syöttää yksin sähköä verkkoon, sen suojaus ei yksin pysty estämään haitallisia jännite- ja taajuusmuutoksia. Tämän myötä ongelmat verkossa lisääntyvät. [41]

Suojauksella voidaan ajatella olevan tietynlaisia ennalta oletettuja ominaisuuksia, kuten selektiivisyys, aukottomuus ja luotettavuus [41]. Selektiivisyydellä tarkoitetaan vian vaikutusalueen rajaamista mahdollisimman pieneksi. Aukottomuuden ja luotettavuuden voidaan ajatella kuvaavan sitä, että suojauksen pitää toimia aina vikatyypistä ja tilanteesta riippumatta. Erilaisia suojauksen kannalta tärkeitä huomioon otettavia asioita ovat

- tuotantolaitoksen verkosta erottaminen verkon ollessa osittain tai kokonaan jännitteetön, yksinsyöttötilanteissa tai taajuuden ollessa asetusten vastainen

- tuotantolaitos ei saa estää verkon syötön palauttamista
- jälleenkytkennän estäminen säilyttämällä valokaari vikapaikassa
- laitoksen liittäminen verkkoon vasta kaikkien verkon vaiheiden ollessa jännitteisiä
- muiden verkon käyttäjien sekä itse laitoksen turhien verkosta erottamisten minimointi
- tuotantolaitoksen suojauksen selektiivisyys muun verkon suojauksen kanssa.

Taulukossa 1 on esitetty erilaisissa häiriötilanteissa vaadittavat suojalaitteiden toiminta-ajat sekä raja-arvot, joiden mukaan suojalaitteet reagoivat. U_n on jakeluverkon nimellisjännite. Saarekekäytönestosuojauksella puolestaan tarkoitetaan suojautumista yksinsyöttöä vastaan.

Taulukko 1. *Tuotantolaitoksen oman suojalaitteiston asetusarvot perustuen lähteeseen [40].*

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 15 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n + 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäytönestosuojaus (LoM)	enintään 5 s	

Lisäehtona taulukossa esitetyille asetusarvoille on, että laitoksen on pystyttävä toimimaan verkossa ainakin 30 minuutin ajan täysin normaalisti taajuusalueilla 47,5-49,0 Hz ja 51,0-51,5 Hz. Yhtä lailla tuotannon pitää pystyä jatkumaan moitteettomasti taajuuden maksimi muutosnopeuden ollessa 2 Hz/s. [40] Taulukon arvot ovat standardin SFS-EN 50438 Suomalaiselle asetettujen arvojen mukaisia [46]. Tuotantolaitos saa kytkeytyä takaisin sähköverkkoon jännitteen ja taajuuden ollessa jälleen asetuksen mukaisia. Ennen uudelleenkytkentää arvojen pitää kuitenkin pysyä sallittujen rajojen sisällä vähintään 60 sekuntia. [41] Generaattorin tahdistaminen verkkoon pitää tehdä automaattikytkimellä eikä kytkimen käyttö käsin saa olla mahdollista [40].

LoM (Loss of Mains) tarkoittaa tilannetta, jossa tuotantolaitos jää yksin syöttämään verkkoa. Tällainen tilanne voi aiheutua esimerkiksi, jos verkko muuttuu jännitteettömäksi. LoM-suojaus on pakollinen erityisesti, kun tuotanto ja mahdollisesti syötettävän saarekkeen kuorma ovat lähes samansuuruiset, jolloin jännite- ja taajuusreleet eivät välttämättä reagoi. [40] Säteittäisessä verkossa tuotantolaitoksella on suurempi todennäköisyys jäädä yksin syöttämään verkkoa, sillä varayhteyksiä ei ole. Vaikka verkon suojaus olisikin toiminut oikein ja erottanut vikapaikan muusta verkosta, voi erotetussa verkossa silti sijaita tuotantoa, joka syöttää verkkoa. Tässä tapauksessa laitoksen oman suojauksen pitää osata

erottaa laitos verkosta. Tavallisesti suojaus reagoi liian suureen kuormitukseen tai jännite- tai taajuusmuutoksiin. [41]

Tuotannon relesuojauksen perusvaatimuksena ovat taulukon 1 mukaiset kolmivaiheiset yli- ja alijännitereleet sekä yksivaiheiset yli- ja alitaajuusreleet. Kyseisten suojien yleisimmät käyttötilanteet ovat verkon häiriöt, saarekekäyttö ja tuotantolaitteiston häiriöt. Jännitereleiden pitää olla kolmivaiheisia, koska se ehkäisee epäsymmetristä verkon syöttöä. Ylijänniterele on erittäin tärkeä suojalaite, sillä suuret ylijännitteet aiheuttavat vakavia tuhoja tuotantolaitteistolle. Alijänniterele voi puolestaan toimia varasuojana tilanteissa, joissa vikavirta heikkenee nopeasti ja ylivirtasuoja ei reagoi. Alijännitereleelle asetetaan sopiva aikahidastus, sillä nopeasti tasaantuvien jännitekuoppien ei toivota erottavan tuotantoa verkosta turhaan. Taajuusreleet sen sijaan suojaavat laitteistoa mekaanisilta ja termisiltä vaurioilta. Alitaajuus voi esimerkiksi aiheuttaa ylimääräistä värinää laitteistoon ja ongelmia jäähtytykseen. [41]

Tuotantolaitteiston oikosulkusuojauksessa voidaan pienjänniteverkossa käyttää vakioaikaylivirtareleitä tai sulakkeita. Vakioaikaylivirtareleet asetetaan pienimmän mahdollisen verkossa esiintyvän oikosulkuvirran mukaisesti, jotta suojaus reagoi herkemmin haitallisiin vikavirtoihin. Sulakkeen nimellisvirta kannattaa valita lähelle voimalan nimellisvirtaa tai ainakin se kannattaa olla seuraava standardin määrittelemä arvo. Näin ollen se ei kytkentätilanteessa todennäköisesti pala tarpeettomasti. [41]

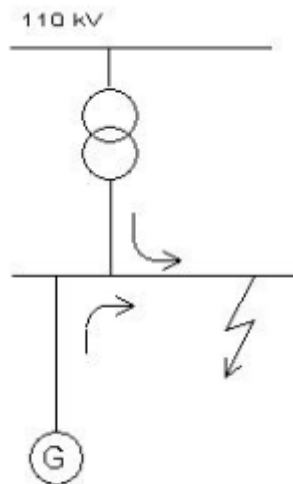
Käytettäessä tuotantolaitosta varasyöttönä pitää käytössä olla kaksoiskytkentä, jolla tarkoitetaan mahdollisuutta käyttää mikrotuotantoa verkon kanssa rinnan tai täysin omavaraisessa saarekkeessa. Näiden tilanteiden samanaikaisuus ei missään tilanteessa saa olla mahdollinen. [40]

Vianilmaisimilla vikojen sijainnit voidaan selvittää nopeasti. Ne voivat kuitenkin yhtä lailla reagoida turhaan, mikäli asetusarvo on pienempi kuin tuotantolaitoksen syöttämä vikavirta. Asetusarvoja on vaikea määrittää tarkasti, mutta minimiarvon voidaan olettaa olevan noin 10 % havahtumisvirtaa pienempi ja maksimiarvon vastaavasti 10 % suurempi. [41]

4.1.3 Mahdolliset vikatilanteet

Mikrotuotantolaitos voi aiheuttaa oikosulkuvirran kasvua. Tämä edelleen voi johtaa siihen, että verkon tärkeät komponentit, kuten muuntajat ja kytkimet lämpenevät liikaa ja mahdollisesti hajoavat. [40] Kuvassa 9 on havainnollistettu tilannetta, jossa vikavirta voi vikapaikassa kasvaa, jos suojaus ei ole toiminut toivotulla tavalla. Kyseisessä tilanteessa vikapaikan havaitseminen vaikeutuu, kun syöttäviä reittejä on useampia. Verkon komponenttien hajoamisen estämiseksi on varmistettava, että niiden oikosulkukestoisuus ei ylitä. Samalla pitää tarkastaa, että suojalaitteiden havahtuminen edelleen toimii. [41] Tilanteeseen voidaan vaikuttaa pienentämällä vikavirtaa verkon vyöhykejaolla, muuntajan

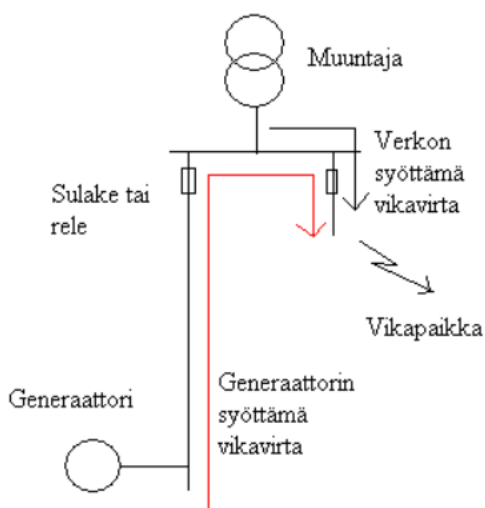
arvoasettelulla tai vikavirtarajoittimilla. Maksimivikavirran suuruuden perusteella voidaan arvioida verkkoon aiheutuvia vaikutuksia ja tuotantolaitoksen maksimitehoa. [40] Kuvassa kyseessä on keskijänniteverkko, mutta vastaava tilanne voi syntyä myös pienjänniteverkossa.



Kuva 9. Tilanteessa vikavirtaa syötetään kahta eri reittiä pitkin, jolloin sen suuruus kasvaa [41].

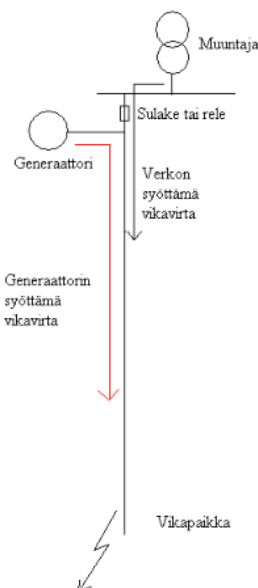
Jälleenkytkentä voi epäonnistua tilanteessa, jossa pientuotantolaitos syöttää vikapaikkaan valokaarta ylläpitävän virran. Se voi olla kuitenkin niin pieni, ettei ylivirtasuojia reagoi siihen. Tuotantolaitos pitää erottaa verkosta, jolloin valokaari saadaan sammumaan ja jälleenkytkentä onnistumaan. Jälleenkytkentä voi aiheuttaa laitteistolle vaurioita, joten verkosta erottaminen on laitteistonkin kestävyyskannalta tärkeää. [41] Suojaus voi häiriintyä kyseisessä tilanteessa toiminta-aikojenkin kautta. Esimerkiksi pikajälleenkytkentäajan ollessa 0,5 sekuntia ja laitoksen erotuslaitteen toiminta-ajan ollessa 0,2 sekuntia, voi jännitteetön aika kokonaisuudessaan olla ainoastaan 0,3 sekuntia, jolloin PJK (pikajälleenkytkentä) ei onnistu. Kyseisen vaaran mahdollisuus voidaan estää pidentämällä PJK:n aikaa, joka esimerkin tapauksessa tarkoittaisi 0,2 sekunnin lisäystä. [40]

Tuotantolaitosta liitettäessä pitää huomioida, että rinnakkaisen johtolähdön vikaantuessa lähtöön syötetty vikavirta ei ole suurempi kuin toimivan lähdön suojauksen arvo. [41] Vaarana on, että täysin normaalisti toimiva lähtö erotetaan verkosta, jos suojaus ei tunnista vikavirtaa ja sen suuntaa [40]. Jos tuotantolaitos syöttää vikapaikkaan viisinkertaisen virran nimellisvirtaan nähden ja suojaus reagoi 500 A:n virtaan, saavat kyseisellä lähdöllä olevat laitokset, tuottaa yhteensä enintään 100 A:n nimellisivirran [41]. Kuvassa 10 on havainnollistettu edellä mainittua tilannetta.



Kuva 10. Tuotantolaitoksen lähdön sulake/rele voi reagoida laitoksen syöttämään vikavirtaan ja näin ollen erottaa toimivan lähdön verkosta täysin turhaan [40].

Toinen vikavirtojen suojaukselle aiheuttama häiriö on mahdollinen, kun syötön ja vika- paikan välissä on mikrotuotantolaitos, joka syöttää vikapaikkaan vikavirtaa. Näin ollen muuntajan syöttämä vikavirta pienenee ja vaarana voi olla, että lähdön suojaus ei reagoi- kaan. [40] Jos välimatka sähköasemalta vikapaikkaan on pidempi kuin tuotannon ja vian välinen etäisyys, oikosulkuimpedanssi kasvaa paljon suuremmaksi sähköaseman ja vian välissä kuin vikapaikan ja tuotannon välissä. Sen myötä vikavirta pienenee ja suojaus hidastuu tai ei reagoi ollenkaan. Tällaisessa tilanteessa laitoksen oman suojauksen täy- tyykin erottaa ensin tuotanto irti verkosta, jolloin verkon suojaus saadaan toimimaan nor- maalisti. [41] Kuvassa 11 on havainnollistettu edellä mainittua tilannetta.



Kuva 11. Lähdön suojaus ei välttämättä reagoi, jos muuntajasyötön ja vikapaikan välissä oleva mikrotuotantolaitos syöttää vikavirtaa vikapaikkaan ja siten pie- nentää kokonaisvikavirran määrää [40].

Keskijänniteverkossa ja sähköasemilla tapahtuvat viat vaikuttavat myös pienjänniteverkossa oleviin tuotantolaitoksiin. Siten tuotantolaitoksen omassa suojauksessa pitää ottaa myös nämä vikatilanteet huomioon. Pienjänniteverkon ja siinä sijaitsevan pientuotannon aiheuttamat viat eivät puolestaan vaikuta korkeamman jännitetason verkkoon, mikäli suojaus toimii selektiivisesti. [41] Keskijänniteverkon vikatilanteet eivät ole kuitenkaan tämän työn kannalta oleellisia, joten ne jätetään tässä tapauksessa huomioimatta.

4.2 Kotitaloustuottajan näkökulma

Kotitaloustuottajan tärkeimmät motiivit oman tuotannon asentamiseksi lienevät taloudelliset säästöt ja ympäristön suojele. Oma tuotanto vähentää tarvetta jakeluverkosta ostettavalle sähkölle ja näin ollen omakotitaloasukkaan on mahdollista säästää rahaa sähkölaskussa. Jos sähköä tuotetaan enemmän kuin kohteessa kulutetaan, ylijäämä voidaan myös myydä jakeluverkkoon. Esimerkiksi Vattenfall lupaa omatuottajille Nord Poolin asettaman tuntikohtaisen spot-hinnan jokaisesta verkkoon syötetystä kilowattitunnista [47]. Uusiutuvat sähköenergiateknologiat vähentävät haitallisten päästöjen määrää, joten kotitaloustuottaja voi näin osallistua yhteiseen tavoitteeseen ilmastonmuutoksen ehkäisemisessä. Älykkäät sähkömittarit mahdollistavat sähkön tuotannon ja kulutuksen tuntikohtaisen seuraamisen, jolloin on helpompi vaikuttaa esimerkiksi kulutustottumuksiin. Tiedot ovat ladattavissa omalle tietokoneelle tai mobiililaitteeseen ja siten ne ovat aina helposti nähtävissä.

Keskimäärin kotitalouden sähkönkulutuksesta 52 % kuluu lämmitykseen, taloussähkön eli sähkölaitteiden kulutukseen 22 % ja käyttövesien lämmittämiseen 20 %. Näin ollen yli puolet sähkönkulutuksesta kohdistuu asunnon lämmittämiseen. [48] Taulukosta 2 ilmenee sähkölämmitteisen omakotitalon keskimääräinen vuosikulutus.

Taulukko 2. Sähkölämmitteisen omakotitalon keskimääräinen sähkönkulutus vuodessa perustuen lähteeseen [48].

Kohde	Kulutus (kWh / vuosi)
Lämmitys	9 600
Veden lämmitys	3 600
Kylmälaitteet	600
Kiuas	1 000
Ruoanvalmistus ja astianpesu	680
Kodin elektroniikka	700
Pyykinpesu ja -kuivaus	600
LVI-laitteet	600
Auton lämmitys	400
Muu kulutus	700
Kulutus yhteensä vuodessa	18 480

Taulukon 2 perusteella voidaan todentaa, että lämmityksen osuus kokonaiskulutuksesta on likimain puolet. Taulukossa 3 on puolestaan tiedot ilman sähkölämmitystä olevan omakotitalon keskimääräisestä vuosikulutuksesta.

Taulukko 3. *Ilman sähkölämmitystä olevan omakotitalon keskimääräinen sähkönkulutus vuodessa perustuen lähteeseen [48].*

Kohde	Kulutus (kWh / vuosi)
Kylmälaitteet	600
Kiuas	1 000
Ruoanvalmistus ja astianpesu	680
Kodin elektroniikka	770
Pyykinpesu ja -kuivaus	600
LVI-laitteet	1 500
Auton lämmitys	300
Muu kulutus	700
Kulutus yhteensä vuodessa	7 300

Kun tarkastellaan taulukon 2 ja 3 tietoja, voidaan huomata, että sähkölämmitteisen omakotitalon vuosittainen kokonaiskulutus on yli kaksinkertainen verrattuna ilman sähkölämmitystä olevaan omakotitaloon.

Tuulivoimalan mitoituksessa kannattaa keskimääräinen tuotanto ja -kulutus sovittaa lähelle toisiaan, jolloin todennäköisyys tuotannon ja kulutuksen tasapainoon on parempi. Koko omakotitalon lämmityksen kattamiseen ainoastaan tuulivoimalla tarvitaan nimellisteholtaan vähintään 5 kW:n voimala. [32] Nimellisteholtaan 2 kW:n voimala pystyy kattamaan puolet tavallisen omakotitaloasujan valaistuksen ja sähkölaitteiden kulutuksesta. Sen sijaan 4-10 kW:n voimala voi hyvillä olosuhteilla kattaa koko omakotitalon valaistus- ja laitekulutuksen sekä ison osan lämmityksen kulutuksesta. [33]

Tuulivoimalan pyörähdyspinta-ala on verrannollinen tuotannon määrään [49]. Sen perusteella tuulivoimaloiden tuotantoa voidaan arvioida ja verrata keskenään. Taulukkoon 4 on koottu tietoja eri kokoisista pientuulivoimaloista. Voidaan huomata, että teho nimenomaan kasvaa potkurin halkaisijan kasvaessa. Vuosituotanto esitetään laajalla vaihteluvälillä sen ollessa verrannollinen sääolosuhteiden muutoksiin. Vertaamalla pientuulivoimalan vuosituotantoa taulukon 2 ja 3 omakotitaloasukkaan keskimääräiseen vuosikulutukseen, voidaan todentaa se, että 4-10 kW:n laitokset pystyvät kattamaan merkittävän osan omakotitalon koko sähkönkulutuksesta.

Taulukko 4. Pientuulivoimalan tietoja perustuen lähteeseen [32].

Potkurin halkaisija (m)	Generaattorin koko (kW)	Vuosituotanto (kWh)
2 - 3	0,2 - 1	< 1 000
3 - 4	1 - 3	1 000 - 3 000
4 - 6	3 - 5	3 000 - 7 000
6 - 10	5 - 10	7 000 - 25 000

Tuulivoimalan kustannukset koostuvat investointi- sekä käyttö- ja ylläpitokustannuksista. Tuulivoimalan investointi on keskimäärin 1,5 miljoonaa euroa MW:a kohti. Kustannukset sisältävät kaikki aiheutuneet menot ennen kuin voimala on käyttövalmis. [50] Edellisen perusteella voidaan arvioida, että kustannukset ovat 1500 €/kW. Sen myötä 4 kW:n voimala tämän perusteella maksaisi noin 6000 euroa. Käyttö- ja ylläpitokustannukset ovat noin 2-3% investointikustannuksista, mikä tarkoittaa 12-18 €/MWh [51]. Tuotantokustannukset puolestaan sisältävät käyttö- ja investointikustannukset. Tuotantokustannus on lähes kiinteä eikä vaihtelee tuotannon mukaan. Suomessa tuotantokustannus esitetään omakustannushintana, joka 4-6 %:n korolla ja 20 vuoden takaisinmaksuajalla tarkoittaa 3-5 snt/kWh. [52]

Taulukkoon 5 on koottu tietoja puolestaan eri kokoisista aurinkosähköjärjestelmistä. Tyyppillisesti järjestelmän koko valitaan kohteen kulutuksen mukaan [53]. Taulukoissa 2 ja 3 esitettyjen eri tyyppisten omakotitalojen keskimääräisten vuosikulutusten perusteella voidaan karkeasti todeta, että XL-paketti kattaa miltei kokonaan vuosittaisen kulutuksen omakotitalossa, jossa ei ole sähkölämmitystä. Sen sijaan sähkölämmitteisen omakotitalon vuosikulutuksesta XL-paketti kattaa reilu kolmanneksen.

Taulukko 5. Aurinkosähköjärjestelmien tietoja perustuen lähteeseen [53].

Peruspaketit	Huipputeho (kW _p)	Vuosituotto (kWh)	Paneelien määrä (kpl)
S	2,1	1 890	8
M	3,1	2 790	10
L	5,2	4 680	20
XL	7,3	6 570	28

Taulukon 4 pakettien hinnat vaihtelevat 5000 eurosta 12 500 euroon. Paneelien lisäksi pakettiin sisältyvät invertteri, asennukseen vaadittavat laitteet ja kaapelit sekä asennustyöt. [54] Tehokkaampi järjestelmä käsittää useampia paneeleja, jolloin myös kustannukset nousevat. Investointien suunnittelussa pitääkin tasapainoilla taloudellisesti kannattavan, mutta riittävän tehokkaan ratkaisun välillä.

Tuotantolaitteistoon voidaan mahdollisesti liittää energiavarastona toimiva akku. Teslan yhden 14 kWh:n Powerwall-akun hinta on hieman alle 7000 euroa. Kun mukaan lasketaan lisälaitteiden ja asennustöiden aiheuttamat kustannukset, yhden akun hinnaksi muodostuu 8000-10 000 euroa. Akun huipputeho on 7 kW ja jatkuva teho 5 kW. [55]

Esimerkkitapauksessa kotitaloustuottaja tuottaa energiaa vuodessa 5480 kWh. Käytössä on 28 aurinkopaneelia, joiden yhteenlaskettu teho on 7 kW_p. Säästöä sähkölaskussa kertyy 448 euroa vuodessa. [53] Jos oletetaan käyttö- tai huoltokustannukset mitättömiksi, XL-paketin investointikustannus 12 500 euroa voidaan 450 euron vuosisäästöllä kattaa vasta yli 27 vuoden jälkeen. Jos huomioidaan mahdolliset käyttö- ja huoltokustannukset sekä aurinkopaneelien noin 30 vuoden käyttöikä, XL-paketin hankkiminen ei ole tämän vuosisäästön puitteissa kovinkaan kannattava.

Uuden tuotannon ja energiavaraston yhteenlaskettu hinta verrattuna kiinteistöjen osto- tai rakennushintoihin sen sijaan eivät prosentuaalisesti ole varsin mittavia. Esimerkiksi 6000 euron pientuulivoimalan kustannuksen osuus 300 000 euron omakotitalon hinnasta on tasan 2 %. 12 500 euron aurinkosähköjärjestelmän osuus on puolestaan 4,2 %. Jos XL-paketin hintaan lisätään 10 000 euron akku, prosentuaalinen osuus kiinteistön hinnasta on 7,5 %. Tuotantolaitteiston hankkiminen ei siis aiheuta merkittävää hinnannousua. Sen sijaan tehokkaiden laitteistojen takaisinmaksuajan puitteissa järjestelmien hintojen täytyy kuitenkin vielä laskea merkittävästi kotitalouksien oman tuotannon lisääntymiseksi.

4.3 Sähköverkkoyhtiön näkökulma

Sähköverkkoyhtiöt pyrkivät kategorioimaan tietynlaisia sähkönkäyttäjiä määrittämällä heille erilaisia kuormitusmalleja. Näiden kuormitusmallien tavoitteena on selvittää kulutuksen määrää ja ajankohtaa. Vuosienergiakulutuksesta voidaan edelleen arvioida tuntikohtaiset tehotarpeet kullekin asiakassektorille. Perustana on siis laajempien ryhmien kulutuksen seuraaminen ja niiden oletaminen yhteneväiseksi. Näin voidaan arvioida kulutuksen keskitehoa. Todellisuudessa kulutus vaihtelee hyvin paljon vuorokauden aikana, jolloin huipputehon määrittämiseksi ei keskitehon tietäminen riitä. Huipputeho voidaan arvioida samankaltaisten asiakkaiden kulutuksen normaalijakauman avulla. Huipputeho on tärkeä tietää, sillä sen avulla pystytään suunnittelemaan verkon mitoitus.

Verkkoyhtiön tulot mahdollisesti pienenevät uuden tuotannon lisääntyessä, jos osa jakeluverkosta ostetusta sähköstä korvataan omalla tuotannolla [5]. Tämän myötä myös kuormitusmallien laadinnan voidaan todeta muuttuvan. Älykkäiden mittareiden ansiosta kulutuksesta ja mahdollisesta tuotannosta saadaan tuntikohtaista tietoa ja kuormitusmallien laatiminen sekä kuluttajien laskuttaminen ovat helpommin toteutettavissa. Tulevaisuudessa on pohdittu siirtymistä tuntiarvoista 15 minuutin arvoihin, joka mahdollistaa vieläkin tarkemman seurannan.

Verkon haltijalla on velvollisuus taata sähkön saanti kuluttajille. Jos 6 tunnin ja 36 tunnin maksimikeskeytysajat ylitetään, verkkoyhtiö on velvollinen maksamaan korvauksia asiakkailleen. Hajautetun tuotannon lisääntyminen voi olla verkkoyhtiöille yksi keino parantaa sähkönjakelun luotettavuutta, sillä hajautettuja tuotantolaitoksia voidaan käyttää myös varasyöttöinä. Hajautettu tuotanto yhdessä energiavarastojen kanssa voivat muodostaa omavaraisia saarekkeita eli mikroverkkoja. Verkkoyhtiöt pohtivatkin investoimista joko mikroverkkoihin tai maakaapeleihin toimitusvarmuuden parantamiseksi. Maakaapeli on säävarma, mutta toisaalta sen rakentaminen on kallista. Lisäksi yhtiöitä mietityttää mahdollisuus, ettei verkkoja enää tulevaisuudessa tarvita. Mikroverkot ovat potentiaalinen vaihtoehto, koska yksittäisten tuottajien määrät ovat joka tapauksessa kasvussa. [56] Mikroverkot ovat kuitenkin vasta tulevaisuuden teknologiaa ja ainakin toistaiseksi maakaapelia tarvitaan toimitusvarmuuden takaamiseksi. Mikroverkoista kerrotaan lisää kappaleessa 5.

5. TULEVAISUUS

Energiapolitiikka, lainsäädäntö sekä erilaiset muut sopimukset ja asetukset ohjaavat sähköenergiajärjestelmän muutoksia myös tulevaisuudessa. Energiantuotanto muuttuu radikaalisti vuoden 2020 jälkeen, jolloin Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaiset toimet alkavat laajemmin. Muutoksen aiheuttajia ovat etenkin teknologian kehitys, uusiutuvia energiantuotantomuotoja hyödyntävän hajautetun tuotannon määrän kasvu, kaupungistuminen, digitalisaatio ja kuluttajan aktiivisempi osallistuminen energiamarkkinoilla. Edellä mainittujen yhteensovittaminen vaatii älykkään ja joustavan tulevaisuuden energiajärjestelmän, jossa tuotantoa sekä kysyntää pystytään paremmin ohjaamaan. Sähkökäyttäjät eivät ole jatkossa ainoastaan kuluttajia vaan samaan aikaan myös tuottajia ja varastoja. Kun edellisiin yhdistetään kehittynyt tietoliikenne ja erityisesti IoT (Internet of Things), on mahdollista luoda aiempaa energiatehokkaampi järjestelmä. [44]

Tuotannon ja kysynnän tasapainottamisessa voidaan hyödyntää energiavarastoja. Niiden kehittämisellä ja etenkin akkujen hintojen laskulla sekä sähköautojen yleistymisellä on suuri vaikutus kotitalouden oman tuotannon yleistymiseen [57]. Sään mukaan vaihtelevien aurinkosähkön ja tuulivoiman käyttöön, varastointi lisää erilaisia uusia mahdollisuuksia [44]. Esimerkiksi päivällä aurinkopaneelien keräämän säteilyn energia voidaan varastoida ja käyttää tarvittaessa vasta illalla, kun aurinko ei enää paista. Mikroverkossa energiavarasto voi puolestaan toimia varasyöttönä, jolloin sähkön toimituksen luotettavuus, verkon joustavuus ja mahdollisuudet reagoida erilaisiin muuttuviin tilanteisiin kasvavat. Näin ollen varastot tukevat merkittävästi omavaraisten saarekkeiden toimivuutta.

Mikroverkolla tarkoitetaan pienempää tuotanto- ja kulutusaluetta, jotka pystyvät tarvittaessa toimimaan täysin omavaraisesti erillään yleisestä jakeluverkosta esimerkiksi häiriön sattuessa verkkoon. Tavallisessa tilanteessa ne kuitenkin ovat kytkettyinä jakeluverkkoon. [56] Olemassa olevaa silmukoitua verkkoa voitaisiinkin hyödyntää saarekekäytössä liittämällä siihen uusia tuotantolaitoksia [5]. Käytännössä mikroverkon tuotannon ja energiavaraston on kyettävä turvaamaan sähkön saanti kyseisellä alueella muutamien vuorokausien ajaksi [44]. Mikro- ja pientuotantolaitosten käyttö ja niistä saatavat tehot ovat kuitenkin vielä varsin usein vähäisiä, jolloin niiden käyttö laajempien alueiden tai saarekkeiden omavaraisena sähkön syöttönä on haastavaa [41]. Lisäksi niiden käyttöönotto vaatii vielä älykkään sähköverkon, ohjausjärjestelmien sekä tiedonsiirron ja -hallinnan kehittymistä. Ennusteiden mukaan ensimmäiset mikroverkot tulisivat olemaan käytössä vuonna 2025. [44]

Lempäälän Marjamäkeen kauppakeskus Ideaparkin ympäristöön on suunnitteilla energiaomavarainen mikroverkko, joka pääasiassa hyödyntää aurinkovoimaa ja kaasumaisia tuotantomuotoja. Laajan 4 MW:n aurinkosähköpuiston kanssa toimii energiavarasto, joka

huolehtii tuotannon ja kulutuksen tasapainosta verkossa. Aurinkopaneelien tehovaihteluiden tasaamisessa käytettävien kaasumoottoreiden yhteensä muodostama kapasiteetti on 8 MW ja polttokennojen 166 kW. Marjamäen mikroverkko tulee pääasiassa olemaan kytettynä yleiseen jakeluverkkoon, mutta se voi tarvittaessa toimia tehoreservinä tai omavaraisena saarekkeena. Mikroverkon kattamalla 300:n hehtaarin alueella pääasialliset sähkönkäyttäjät ovat teollisuusyrityksiä. [58]

Tulevaisuudessa voi olla mahdollista, että kuluttaja on täysin omavarainen tuottaja eikä tarvitse oman kulutuksensa kattamiseen jakeluverkon sähköä. [56] Keskustelua on käyty siitäkin, tarvitaanko tulevaisuudessa sähköverkkoja ollenkaan, jos kaikki sähkönkäyttäjät omistaisivat omaa tuotantoa ja energiavarastoja. Vaikka mikroverkot tulevaisuudessa yleistyisivätkin, sähkönjakeluverkko ei tule vielä vuosiin tai mahdollisesti koskaan poistumaan käytöstä vaan keskitetty tuotanto ja sähköverkko tulevat edelleen toimimaan sähköntuotannon ja -jakelun perustukipilareina.

6 YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen hidastamiseksi ja sähköntoimitusvarmuuden parantamiseksi lainsäädäntö on tiukentanut toimintaa energiamarkkinoilla. Tästä huolimatta sähkölaitteiden määrä kasvaa koko ajan ja siten energiaa tarvitaan enemmän. Tämä asettaa sähköverkon toiminnallisuudelle ja tavallisten sähkökuluttajien toimille uusia vaatimuksia, jotta ympäristön suojelemiseksi asetettuihin tavoitteisiin päästään. Ilmaston lämpenemisen lisäksi sähköverkkoyhtiöillä on huolehdittavana myös sähkön luotettava toimitus.

Sähkönjakelun turvaamiseksi verkkoyhtiöt panostavat etäluettaviin ja kauko-ohjattaviin ratkaisuihin. Ilmastonmuutoksen hidastamiseksi uusiutumattomia sähköntuotantomuotoja pyritään korvaamaan uusiutuvilla, joista kotitalouden omatuottajan kannalta yleisimpiä ovat tuulivoima ja aurinkosähkö. Niiden osuudet Suomen kokonaissähköntuotannosta ovat vielä varsin pieniä, mutta niiden määrät tulevat kasvamaan koko ajan. Kotitalouden oma tuotanto on hajautettua tuotantoa, joka yleisimmin voidaan määritellä olevan lähellä kulutusta sijaitsevaa pienimuotoista tuotantoa. Sen aiheuttama oleellinen muutos on kahden suuntainen tehon siirto.

Älykkäiden komponenttien sekä hajautetun tuotannon määrän kasvaessa tarvitaan älykästä sähköverkkoa, jossa etäluettavat mittarit jakavat tietoa kulutuksesta tuntikohtaisesti sekä verkkoyhtiölle, että kuluttajalle. Näin verkkoyhtiö pystyy ennustamaan kulutustotumuksia paremmin ja kuluttaja tai kotitalouden omatuottaja pystyy seuraamaan omaa kulutustaan tai mahdollista tuotantoaan. Jos tuotantolaitteiston rakentamiseksi on myönnetty lupa ja siitä on lähetetty kaikki vaaditut dokumentit, tuottajalla on oikeus liittyä sähköverkkoon.

Liitettävälle uudelle tuotannolle on laadittu standardien mukaisia vaatimuksia sähkön laadun, suojauksen ja turvallisuuden osalta. Uusi tuotantolaitos ei saa aiheuttaa minkäänlaisia häiriöitä toiminnallaan. Erityisesti sähkön laadun kannalta tarkastelussa on jännitetasojen muutokset, nopeat jännitemuutokset, verkkoon kytkentä- ja erotustilanteet, taajuu-den muutokset sekä vikavirtojen kasvu. Uuden tuotantolaitoksen maksimiteho voidaan myös määrittää, kun tiedetään suurimman sallitun vikavirran arvo. Suojaukselle on määritelty erilaisia toimintatapoja, miten sen kuuluisi toimia erilaisissa verkon häiriötilanteissa. Tarvittaessa tuotantolaitteiston suojauksen tehtävänä on erottaa laitos yleisestä verkosta laitteiston itse aiheuttaessa häiriötä tai muissa verkon häiriötilanteissa. Erityisesti suojauksessa pitää huomioida, että suojalaitteiden asetteluarvot ovat standardien mukaiset, jotta ne toimivat asianmukaisesti. Mahdollisia verkon vikatilanteita ovat verkon suojauksen häiriöt, kuten terveiden lähtöjen turhat erottamiset tai vikavirran lasku niin, että suojaus ei reagoi, sekä vikavirran liiallinen kasvu vikapaikassa.

Sähkölämmityksestä aiheutuu keskimäärin puolet omakotitalon sähkönkulutuksesta. Mahdollisen tuotantolaitteiston teho mitoitetaan yleensä kulutuksen mukaan. Tuulivoimaloiden kustannukset ovat arviolta 1500 €/kW. Aurinkopaneelijärjestelmien kustannukset sen sijaan vaihtelevat 5000 ja 12 500 euron välillä riippuen paneelien määrästä. Kun kustannuksia verrataan mahdollisiin säästöihin, takaisinmaksuaika voi muodostua todella pitkäksi. Sen myötä investointi ei ole kannattava. Hankintahintojen pitää laskea tai vastaavasti säästöjen kasvaa, jotta oman tuotannon asentaminen olisi houkuttelevampaa. Energiavarastot ovat myös merkittävässä roolissa oman tuotannon hankinnassa, sillä niillä voidaan sovittaa tuotanto ja kulutus paremmin yhteen. Akun investointi voi asennettuna olla 8000-10 000 euroa. Kun tuotantojärjestelmän ja akkujen yhteenlaskettua hintaa verrataan asuinkiinteistön ostohintaan, ei investointi prosentuaalisesti ole kuitenkaan niin merkittävä.

Sähköverkkoyhtiön kannalta kuluttajan mahdollisuus tuottaa sähköä aiheuttaa asiakasryhmien ja kuormitusmallien uudelleen määrittystä. Lisäksi verkkoyhtiöt pohtivat investoimisen kannattavuutta joko maakaapeliin tai tulevaisuuden mikroverkkoihin toimitusvarmuuden parantamiseksi. Maakaapeli on säävarma, mutta kallis ratkaisu. Mikroverkkojen on sen sijaan ennustettu yleistyvän yksittäisten tuottajien kiinnostuessa omasta tuotannosta. Mikroverkot ovat kuitenkin vielä kehitysasteella ja tulevaisuuden ratkaisuja, joten maakaapelin rakentamiseen panostetaan vielä vuosia.

Tulevaisuuden sähköenergiajärjestelmä muotoutuu erilaisten lakien ja sopimusten mukaisesti. Toimenpiteet ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi lisääntyvät ja teknologia kehittyy entisestään. Energian varastoinnin ja hajautetun, uusiutuvan tuotannon kasvu edesauttavat mikroverkkojen kehittymistä. Tyypillinen sähkönkäyttäjä voi tulevaisuudessa toimia kuluttajana, tuottajana sekä varastoijana. Yleisen sähköverkon tarpeellisuus on myös kyseenalaistettu, mikäli mikroverkkojen käyttö tulee yleistymään. Keskitetty tuotanto ja jakeluverkko tulevat kuitenkin vielä pitkään olemaan sähköenergiajärjestelmän perusta. Siihen liitettävä uusi tuotanto ja mikroverkot voivat tarvittaessa turvata toimitusvarmuutta sekä ohjata kulutusta ja tuotantoa vastaamaan toisiaan.

LÄHTEET

- [1] V.C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, G.P. Hancke, Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, Iss. 4, 2011, pp. 529-539. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6011696>.
- [2] Tekniikan maailma, Sähkön kulutus Suomessa nousi juuri korkeimmalle tasolle yli vuoteen, 2018, Saatavissa (viitattu 14.3.2018): <https://tekniikanmaailma.fi/sahkon-kulutus-suomessa-nousi-juuri-korkeimmalle-tasolle-yli-vuoteen/>.
- [3] Energiateollisuus, Energiavuosi 2016 SÄHKÖ: Sähkönkäyttö kääntyi nousuun, Saatavissa (viitattu 21.3.2018): https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2016_sahko_sahkonkaytto_kaantyi_nousuun.html.
- [4] Sähkömarkkinalaki, L 2013/588, 2013, Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>.
- [5] E. Lakervi, J. Partanen, Sähkönjakelutekniikka, Otatieto, Helsinki University Press, 2008, 285 s.
- [6] Elenia, Älykäs sähköverkko, Saatavissa (viitattu 6.3.2018): <http://www.elenia.fi/sahko/innovaatiot>.
- [7] Suomen virallinen tilasto (SVT), Kasvihuonekaasut, [verkkojulkaisu] ISSN=1797-6049, 2016, Helsinki tilastokeskus, Saatavissa (viitattu 16.3.2018): http://www.stat.fi/til/khki/2016/khki_2016_2017-12-08_tie_001_fi.html.
- [8] Ympäristöministeriö, Pariisin ilmastopöytäkirja, 2016, Saatavissa (viitattu 21.3.2018): <http://www.ym.fi/pariisi2015>.
- [9] Energiateollisuus, Suurin haaste on taakanjakosektorin päästövähennystavoite, Saatavissa (viitattu 21.3.2018): https://energia.fi/energiateollisuuden_edunvalvonta/energia-politiikka/energia_ja_ilmastrategia.
- [10] Energiateollisuus, Ilmastonmuutoksen hillintä ohjaa energiantuotantoa Saatavissa (viitattu 21.3.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto.
- [11] Energiateollisuus, Päästökauppa on hyvä keino toteuttaa ilmastotavoitteita, Saatavissa (viitattu 21.3.2018): https://energia.fi/energiateollisuuden_edunvalvonta/energia-politiikka/ilmastopolitiikka/paastokauppa.
- [12] R. Hirvonen, VTT, Suomen energiavisio 2030, 30 s. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tivistelmä.pdf.

[13] J. Momoh, Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis, John Wiley & Sons, Incorporated, Hoboken, UNITED STATES, 2012, 218 p. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tut/reader.action?docID=818488&query=>.

[14] Lappeenrannan yliopisto, Älykäs sähköverkko - Smart grid, Saatavissa (viitattu 8.3.2018): <https://www.lut.fi/green-campus/vihrea-energia-ja-teknologia/alykas-sahko-verkko-smart-grid>.

[15] M. Lu, J. Ma, W. Wang, Authentication and Integrity in the Smart Grid: An Empirical Study in Substation Automation Systems - ProQuest, 212, Available: <https://search-proquest-com.libproxy.tut.fi/docview/1038355771?pq-origsite=summon>.

[16] J. Valtari, J. Jussila-Suokas, T. Jacobson, Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat (SGEM) tutkimusohjelman loppuraportti, 2014, 29 s. Saatavissa: http://is-suu.com/cleentd/docs/cleen_sgem_loppuraportti_digipublis.

[17] Fingrid, Kysyntäjousto, Saatavissa (viitattu 8.3.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>.

[18] ABB, Energian varastointi, Saatavissa (viitattu 8.3.2018): <http://new.abb.com/fi/alykas-sahko-verkko/teknologiat/energian-varastointi>.

[19] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Zeraoui, Energy storage: Applications and challenges, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 120, 2014, pp. 59-80. Available: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S0927024813004145>.

[20] Vattenfall, Smart Grid, Available (Cited 24.4.2018): <https://corporate.vattenfall.de/energie-im-fokus/energieverteilung/stromverteilung/smart-grid/>.

[21] Invest in Finland, Smart grid, Saatavissa (viitattu 9.3.2018): <https://www.investinfinland.fi/smart-grid>.

[22] Energiateollisuus, Ydinvoimalla päästötöntä sähköntuotantoa, Saatavissa (25.4.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/ydinvoima.

[23] TVO, Olkiluoto 3, Saatavissa (viitattu 25.4.2018): <https://www.tvo.fi/Ol3>.

[24] Energiateollisuus, Sähköntuotanto, Saatavissa (viitattu 20.2.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto.

[25] Lappeenrannan yliopisto, Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa, 2014, Saatavissa (viitattu 20.2.2018): https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa.

[26] Energiateollisuus, Säättövoima - säädettävää sähköntuotantoa, Saatavissa (viitattu 20.2.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatoivoima.

- [27] Findikaattori, Sähkön hankinta ja kulutus, 2017, Saatavissa (viitattu 21.3.2018): <http://findikaattori.fi/fi/21>.
- [28] Tuulivoimayhdistys, Tietoa tuulivoimasta, Saatavissa (viitattu 22.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>.
- [29] Tuulivoimayhdistys, Tuulivoimaloiden rakenne, Saatavissa (viitattu 22.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>.
- [30] Energiateollisuus, Tuulivoiman lisäämiseksi on potentiaalia, Saatavissa (viitattu 22.2.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/tuulivoima.
- [31] P. Poikonen, T. Keikko, Koskelainen Lasse, L. Laurila, Pyrhönen Juha, S. Repo, P. Turunen, S. Valkealahti, Hajautetun sähköntuotannon teknologian ja tekniikoiden nykytila sekä tulevaisuuden kehitysnäkymät, Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkövoimatekniikan laitos, Tampere, 2005, 136 s.
- [32] E. Eklund, Tuulivoimayhdistys, Jokamiehen opas pientuulivoiman käyttöön, Tampere, 2011, 20 s. Saatavissa: http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/759-Joka_miehen_opas_motiva.pdf.
- [33] Tuulivoimayhdistys, Pientuulivoima, Saatavissa (viitattu 20.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima>.
- [34] Energiateollisuus, Aurinkosähkö, Saatavissa (viitattu 21.2.2018): https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima.
- [35] Motiva, Auringon säteilyn määrä Suomessa, 2018, Saatavissa (viitattu 23.3.2018): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa.
- [36] Motiva, Aurinkosähköjärjestelmän teho, 2017, Saatavissa (viitattu 23.3.2018): https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho.
- [37] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer, Distributed generation: definition, benefits and issues, Energy Policy, Vol. 33, Iss. 6, 2005, pp. 787-798. Available: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tut.fi/science/article/pii/S0301421503003069>.
- [38] Caruna, Urakoitsijaohjeet, Saatavissa (viitattu 18.4.2018): <https://www.caruna.fi/urakoitsijat/urakoitsijaohjeet>.
- [39] I. Lehto, Energiateollisuus, Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon, 2011, 4 s. Saatavissa: https://energia.fi/files/1248/Ohje_tuotannon_liittamisesta_jakeluverkkoon_PAIVITETTY_20160427.pdf.

- [40] Energiategollisuus, Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon, 2016, 18 s. Saatavissa: https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakeluverkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf.
- [41] Sähköenergialiitto ry SENER, Pienvoimaloiden liittäminen jakeluverkkoon, 2001, 25 s. Saatavissa: https://energia.fi/files/2257/Pienvoimaloiden_liittaminen_jakeluverkkoon_Sener_2001.pdf.
- [42] H. Laaksonen, S. Repo, Tuulivoimateknologia sähköjakeluverkoissa, Tampereen teknillinen yliopisto, Sähkövoimatekniikka, Tampere, 2003, 87 s.
- [43] E. Tiainen, Sähköinfo Oy, Aurinkosähköjärjestelmän asentaminen, 2015, 30 s. Saatavissa: <http://docplayer.fi/7290814-Aurinkosahkojarjestelman-asentaminen-esa-tiainen-sahkoinfo-oy-2015-sahkoinfo-oy.html>.
- [44] P. Salokoski, Tekes, Tulevaisuuden energia 2030...2050 taustaraportti, 2017, 37 s. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2772829/332_2017_Tulevaisuuden+energia_2030_2050.pdf/4f1c0ec0-58fc-4c1c-9297-7f90ac01615b.
- [45] R. Laine, Verkkoon liitettävien aurinkosähköjärjestelmien pilottihanke, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, 61 s. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/25669/Laine.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- [46] I. Lehto, Energiategollisuus, Tekninen liite 1 ohjeeseen sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon - nimellistehoaltaan enintään 100 kVA laitoksen liittäminen, 2011, 4 s. Saatavissa: https://energia.fi/files/1249/tekninen_liite_1_-_enintaan_100_kVA_PAIVITETTY_20160427.pdf.
- [47] Vattenfall, Omatuotanto-sopimus, Saatavissa (viitattu 15.4.2018): <https://www.vattenfall.fi/aurinkopaneeli/omatutuotanto-sopimus/>.
- [48] Vattenfall, Kodin sähkönkulutus, Saatavissa (23.3.2018): <https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/>.
- [49] Tuulivoimayhdistys, Tuulivoimatekniikka, Saatavissa (viitattu 22.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka>.
- [50] Tuulivoimayhdistys, Investoinnit, Saatavissa (viitattu 22.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/investoinnit>.
- [51] Tuulivoimayhdistys, Käyttö- ja ylläpitokustannukset, Saatavissa (viitattu 20.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/kaytto-ja-yllapitokustannukset>.
- [52] Tuulivoimayhdistys, Tuotantokustannukset, Saatavissa (viitattu 20.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/tuotantokustannukset>.

[53] Vattenfall, Omavaraista energiaa, Saatavissa (viitattu 17.4.2018): <https://www.vattenfall.fi/aurinkopaneeli/kampanja/>.

[54] Vattenfall, Aurinkopaneeli omakotitaloon, Saatavissa (viitattu 17.4.2018): <https://www.vattenfall.fi/aurinkopaneeli/aurinkopaneelit-taloon/>.

[55] Tesla, Powerwall, Saatavissa (viitattu 23.4.2018): https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall.

[56] S. Uski, P. Aalto, K. Forssén, H. Holttinen, M. Kojo, S. Repo, T. Rosqvist, J. Sarsama, K. Talus, EL-TRAN, Mikroverkkojen mahdollisuuksista sähkön toimituksen luotettavuuden parantajana, 2018, 6 s. Saatavissa: <https://el-tran.fi/2018/01/29/mikroverkoilla-saavarmuutta-haja-asutusalueiden-sahkonjakeluun/>.

[57] S. Alhava, VTT, Energiavarastojen kysyntä kasvaa vauhdilla, 2016, Saatavissa: www.vtt.fi/Impulssi/Pages/Energiavarastojen-kysynta-kasvaa-vauhdilla.aspx.

[58] Lempäälän energia, Hanke-esittely, Saatavissa (viitattu 28.4.2018): <http://www.lempaalanenergia.fi/content/fi/1/20149/Hanke-esittely.html>.